

Mise en place du modèle agri-environnemental SWAT sur le bassin versant du Mercube (Haute-Savoie) :

Vers une modélisation des transferts de phosphore

RENAUD Julien
Mars-Septembre 2004

Maître de stage :
POULENARD Jérôme

Remerciements

Après une année passée entre Hanoï et St Etienne, loin des montagnes et de l'Université de Savoie, ce stage peut être considéré comme un retour aux sources.

Le principal responsable de ce retour dans les couloirs du CISM est mon maître de stage Jérôme POULENARD à qui je souhaite exprimer toute ma gratitude et ma sympathie pour m'avoir permis d'intégrer l'UMR et pour avoir sacrifié une bonne partie de son budget pour m'équiper d'un matériel correct. Les conversations professionnelles tenues avec lui n'ont fait que m'éclairer pour avancer dans mon travail, et les discussions extra professionnelles d'enrichir ma culture personnelle. Je renonce cependant Jérôme à écrire cette partie de remerciements à la manière de Pérec, sans le moindre « e »...

Mes plus vifs remerciements prennent la route de Thonon pour taper à la porte de l'INRA et du bureau de Jean-Marcel Dorioz. Bien des doutes ont été levés grâce à lui, de nombreuses zones d'ombres éclaircies. Je lui suis également très reconnaissant pour les précieux conseils prodigués pour les concours de l'INRA et espère un jour pouvoir travailler avec lui au sein de la même famille.

De chaleureux remerciements s'envolent vers Québec réchauffer Julie Deslandes à l'IRDA. Son « cyber soutien » a été capital pour l'utilisation du modèle. Bien des bogues et imprécisions ont été résolus grâce à elle. Sa patience m'a été d'un grand secours, merci donc Julie et que la force SWAT avec toi...

Je souhaite également remercier monsieur Phillippe Quétin et monsieur Moille à l'INRA Thonon pour m'avoir fourni l'ensemble des données météo et pour m'avoir accompagné sur le terrain.

Une pensée particulière est adressée à François Cena, conseiller agricole à la chambre d'agriculture de la Haute Savoie qui m'a guider dans les choix à faire concernant les variables agronomiques.

« And last but not least », un grand merci à l'ensemble des gens « errants » dans les couloirs du CISM. Je pense notamment à Jean Yves pour ses conseils avisés en hydrogéologie, Caz pour tout un nombre de détails techniques, Tonio pour les doux massages d'oreilles à grands coup de guitares saturées, Flop pour sa bonne humeur, Fabien et ceux que j'oublie...la convivialité et l'amitié glanée auprès d'eux aura été essentielle pour le bon déroulement de ce stage.

Résumé

Alertés par la CIPEL (commission Internationale de Protection des Eaux du Léman), les pouvoirs publics ont maintenant bien pris conscience des problématiques d'eutrophisation de l'eau du lac, d'excès de phosphore et de pollution diffuse par cet élément. Dans un souci de minimiser ces apports et les transferts depuis la parcelle agricole jusqu'au réseau hydrographique, de nouvelles politiques agricoles et de nouvelles actions d'aménagement doivent être engagées. Dans cette optique, la modélisation hydrologique et la simulation des transferts de phosphore apparaît comme essentielle pour bien comprendre les mécanismes de transfert du phosphore, et ainsi déterminer les zones et les périodes de l'année présentant des risques. Fort de ces simulations, il est ensuite possible de voir les effets des différents scénarios agri-environnementaux proposés par les différentes politiques agricoles locales.

Ce rapport présente donc la mise en place du modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool) sur un petit bassin versant agricole de la région de Thonon en Haute-Savoie. Les données utilisées par le modèle (Modèle Numérique de Terrain, sol, données climatologiques) seront rentrées sur un Système d'Informations Géographiques (SIG) et plus précisément sur les produits de la gamme ESRI (Arcview 3.2) afin de faciliter leur intégration et leur paramétrage. Des essais de simulations seront ensuite pratiqués afin de corréliser le mieux possible les variables simulées avec les variables observées.

Mots clés : eutrophisation, phosphore, pollution diffuse, modèle hydrologique, SIG

Alerted by the CIPEL (International Commission of Protection of Water of Léman), the authorities became now well aware of the problems of eutrophication of the water of the lake, of excess of phosphorus and diffuse pollution by this element. In a concern of minimizing these contributions and the transfers from the agricultural piece to the hydrographic network, new agricultural policies and new actions of installations must be committed. Accordingly, hydrological modeling and the simulation of the transfers of phosphorus appear essential for including/understanding the mechanisms of transfer of phosphorus, and thus determining the zones and the periods of the year presenting high risks. Extremely of these simulations, it is then possible to see the effects of the various agri-environmental scenarios suggested by the various local agricultural policies.

This report thus presents the installation of the hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool) on a small agricultural area catchment area of Thonon in Haute-Savoie. The data used by the model (Digital Elevation Model, soil, climatological data) will have to be integrated on GIS and more precisely on the products of the ESRI range (Arcview 3.2) in order to facilitate their integration and their parameter setting. Tests of simulations will be then practised in order to correlate the best way possible the variables simulated with the variables observed.

Key words : eutrophication, phosphorus, diffuse pollution, hydrological model, GIS

REMERCIEMENTS.....	2
RESUME.....	3
INTRODUCTION	6
 PARTIE 1 :	 8
LA PROBLEMATIQUE DU PHOSPHORE DANS LA ZONE DU LEMAN	8
1) EUTROPHISATION ET PHOSPHORE.....	9
a) <i>Le phénomène d'eutrophisation.....</i>	<i>9</i>
b) <i>l'origine du phosphore.....</i>	<i>9</i>
c) <i>La pollution diffuse d'origine agricole.....</i>	<i>11</i>
2) LE CONTEXTE LEMANIQUE	11
a) <i>Evolution des taux de phosphore dans le Léman.....</i>	<i>11</i>
b) <i>Méthodes de lutte et intérêt de la modélisation</i>	<i>12</i>
c) <i>Objectifs du stage.....</i>	<i>13</i>
 PARTIE 2.....	 14
LE BASSIN VERSANT	14
1) LE CHOIX DE LA ZONE D'ETUDE	15
2) CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DU BASSIN	15
a) <i>Topographie.....</i>	<i>16</i>
b) <i>Géologie et pédologie.....</i>	<i>17</i>
c) <i>Hydrographie.....</i>	<i>21</i>
d) <i>Occupation du sol</i>	<i>22</i>
 PARTIE 3.....	 23
LE MODELE SWAT	23
1) GENERALITES SUR LES MODELES	24
a) <i>Définitions.....</i>	<i>24</i>
b) <i>Différents types de modèles hydrologiques.....</i>	<i>24</i>
2) DESCRIPTION DE SWAT	25
a) <i>Généralités.....</i>	<i>25</i>
b) <i>Principes</i>	<i>26</i>

PARTIE 4 :	30
PARAMETRAGE DES DONNEES D'ENTREE ET MISE EN ŒUVRE DU MODELE	30
1) LES DONNEES NECESSAIRES AU FONCTIONNEMENT DE SWAT	31
a) <i>Topographie</i>	31
b) <i>Hydrographie</i>	32
c) <i>Pédologie</i>	32
d) <i>Occupation du sol et pratiques agricoles</i>	32
e) <i>Données climatiques</i>	33
2) LES DIFFERENTES ETAPES DE LA MISE EN ŒUVRE DE SWAT	34
a) <i>Discretisation spatiale</i>	34
b) <i>Intégration des données sol et occupation du sol</i>	38
c) <i>Distribution des HRU</i>	42
d) <i>Intégration des données climatiques</i>	43
e) <i>Intégration des pratiques agricoles</i>	45
3) SIMULATION	46
a) <i>Options de simulations</i>	46
b) <i>Fichiers de sortie</i>	48
PARTIE 5 :	49
CALIBRATION PRELIMINAIRE DU MODELE.	49
1) METHODOLOGIE	50
2) AJUSTEMENT DU BILAN HYDRIQUE	51
3) RESULTATS	52
PARTIE 6 :	56
DISCUSSION ET CONCLUSION	56
BIBLIOGRAPHIE	62
GLOSSAIRE	67
ANNEXES	69

Introduction

Des phénomènes comme l'explosion démographique et le développement industriel des soixante dernières années ont engendrés une profonde mutation de l'agriculture et des paysages agricoles. L'augmentation de la population et de ses besoins ainsi que la baisse du nombre d'agriculteurs ont contraint les exploitants à intensifier leurs productions pour continuer à assurer leurs revenus. Cette intensification se traduit par une augmentation des apports en nutriments pour améliorer les rendements, une disparition des zones naturelles pour remplacer les parcelles agricoles dévorées par la pression foncière et les phénomènes de « rurbanisation ». L'intensification de l'agriculture et la disparition des zones naturelles décuplent les phénomènes de lessivage et d'érosion des sols qui associés à l'augmentation des apports en fertilisants provoquent des pertes de nutriments vers le réseau hydrographique. Ces phénomènes se répercutent sur notre environnement et sont responsables de problèmes préoccupants de dégradation de la qualité des eaux.

Depuis les années 1980 et leur cortège de catastrophes écologiques, une prise de conscience des enjeux environnementaux a émergé. Les problématiques des organismes de recherche ne sont plus celles d'accroissement de rendement et d'amélioration des espèces. Une place de plus en plus importante est faite aux problématiques de dégradation des sols ou de pollution des ressources en eaux.

C'est ainsi que dans le contexte lémanique, des acteurs comme l'INRA (Institut National de Recherche Agronomique) ou la CIPEL (Commission Internationale de Protection des Eaux du Léman) tentent de lutter contre les phénomènes de dégradation de l'eau du lac. En effet depuis les années 1950, le lac Léman souffre d'eutrophisation causé par des apports excessifs en phosphore. Ces apports de phosphore ont deux origines :

- La première provient des émissions ponctuelles issues des égouts et de l'utilisation de phosphates dans les lessives rejetées dans le milieu naturel, des rejets domestiques en général.
- La seconde, provient des émissions diffuses issues du ruissellement et de l'érosion des parcelles agricoles en cultures vers le réseau hydrographique se jetant dans le lac.

La première origine est en passe d'être maîtrisée, notamment par l'interdiction des lessives phosphatées et le raccordement presque complet des habitations à des réseaux d'assainissement de plus en plus efficaces. C'est donc sur cette deuxième origine que porte ce travail. Agir sur les sources de pollution diffuses implique une bonne connaissance des risques de transfert et des modes de transport du phosphore dans le réseau hydrographique. La modélisation apparaît comme outil permettant de répondre à plusieurs objectifs. Couplée à un Système d'Information Géographiques (SIG), elle permet de spatialiser et de quantifier les processus aboutissant aux transferts de polluants. Dans un second temps elle permet de proposer différents scénarios agro-environnementaux (occupation du sol, travail du sol, urbanisation...) et d'en mesurer les effets sur les quantités de polluants qui atteindront le réseau hydrographique, puis le lac.

Dans cette optique de modélisation des phénomènes conduisant aux pertes de phosphore, mon travail a été de mettre en place au sein de l'UMR INRA CARRETEL (Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et Ecosystèmes Limniques) le modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool) sur un petit bassin versant du Léman situé près de Thonon dans le Bas-Chablais (Haute-Savoie). Les objectifs consistent dans un premier temps à mettre en place le MNT et les premières couches de données SIG nécessaires au fonctionnement des modèles de transfert : nature et mode d'occupation des sols, réseaux hydrographiques. Cette phase est pour partie effectuée à partir de documents déjà existants et pour une autre partie à partir de travaux de terrain (sols, végétation....). Le modèle SWAT doit ensuite être adapté aux bassins versants étudiés, puis calibrés.

Ce mémoire se divise donc en plusieurs parties, la première s'attachera à présenter la problématique du phosphore dans le contexte lémanique et faire un rappel bibliographique général sur le phosphore et ses modes de transferts. La seconde partie présentera les caractéristiques physiques du bassin versant étudié. Une troisième partie introduira le lecteur aux modèles hydrologiques et plus spécialement SWAT. Présentée à la manière d'un didactiel, la quatrième partie montrera les différentes étapes jalonnant la mise en place de SWAT (paramétrages et intégration des données). Une cinquième partie présentera les résultats obtenus et entamera une discussion sur les intérêts et les limites de la modélisation hydrologique dans le cadre d'une étude sur les transferts de polluants dans un petit bassin versant. Elle ouvrira ensuite sur les perspectives, les progrès à faire et les méthodes à mettre en place pour améliorer les résultats fournis par le modèle.

Partie 1 :

La problématique du phosphore dans la zone du Léman

1) Eutrophisation et phosphore

a) Le phénomène d'eutrophisation

Le problème des lacs est leur capacité à accumuler les polluants. La relative immobilité de leurs eaux permet à la pollution de s'installer sans s'évacuer (Roch, 1992). Parmi ces polluants, le phosphore (P) est responsable du phénomène d'eutrophisation causé par un apport excessif de ce dernier (CIPEL, 1998).

Le phosphore rejeté en milieu lacustre est consommé sous la forme soluble par les algues favorisant ainsi leur développement. Les lacs et les réservoirs peuvent être classiquement classés en 2 catégories : oligotrophes¹ ou eutrophes² selon leur concentration en P. Le terme mésotrophe décrit l'état de transition entre les deux états précédents. Aux différentes valeurs de concentration en P correspondent des seuils affectant les paramètres descriptifs de l'eau (concentration en chlorophylle, profondeur de la transparence au disque de Secchi...).

L'eutrophisation d'un réservoir est caractérisée par une surpopulation d'algues vertes, une diminution de l'oxygène dissous dans l'eau, une baisse de la diversité floristique et faunistique, et une coloration verte de l'eau affectant les activités de loisirs liées aux lacs (baignade, navigation...). En ce qui concerne la préparation d'eau potable, l'eutrophisation est la cause de l'obstruction de filtres de pompage d'eau potable, de la diminution des performances de traitement des eaux (filtration, floculation...). Une faune parasite peut dès lors s'installer dans les réseaux. Le développement d'un goût et d'une couleur rendent l'eau impropre à la consommation, enfin, certaines algues sécrètent des toxines dangereuses pour tous les êtres vivants tant pour le plancton que pour les organismes supérieurs.

Bien que de nombreux facteurs contribuent à l'eutrophisation des lacs et des plans d'eau, une attention plus particulière est portée au phosphore du fait du caractère limitant dans les milieux lenticles. Les valeurs usuelles du rapport N/P dans les milieux aquatiques montrent ainsi que parmi ces deux éléments, c'est généralement le phosphore qui est limitant. Il est donc généralement la cible privilégiée des programmes de restauration (Barroin 1991).

b) L'origine du phosphore

La pollution des eaux résulte d'une multitude de rejets dans le réseau hydrographique. Le premier type de rejets, les plus importants, atteignent les cours d'eau au rythme des activités humaines. Ils sont dits ponctuels. L'exemple type est celui d'un tuyau d'égout se déversant dans le réseau hydrographique. La source est généralement localisable et doit faire l'objet d'assainissement.

¹ Oligotrophe : Pauvre en éléments nutritifs, caractérisé par des eaux limpides, un bon équilibre entre les végétaux, les animaux et les micro-organismes responsables de la décomposition des déchets organiques.

² Eutrophe : Lac caractérisé par un déséquilibre croissant entre les processus de synthèse de la matière organique stimulé par l'apport important de fertilisants et les processus de décomposition de cette matière.

Les autres rejets sont appelés diffus. Ils s'effectuent pendant les périodes pluvieuses, le plus souvent par ruissellement sur les terrains agricoles ou les terrains urbanisés imperméables. Il est souvent difficile d'en déterminer leur origine géographique et il peuvent être traités que par un changement de la gestion du territoire.

Ces deux types d'entrée dans le réseau hydrographique n'ont pas non plus les mêmes proportions en terme de quantité. L'INRA de Thonon dispose de mesures effectuées pendant trois années sur 4 bassins versants. Les études présentées dans un rapport de la CIPEL ont montré que :

- les sources ponctuelles sont dominantes (80% dont 10 à 20 % peuvent être attribués à l'agriculture)
- les sources diffuses représentent 20 % des rejets et sont principalement agricoles

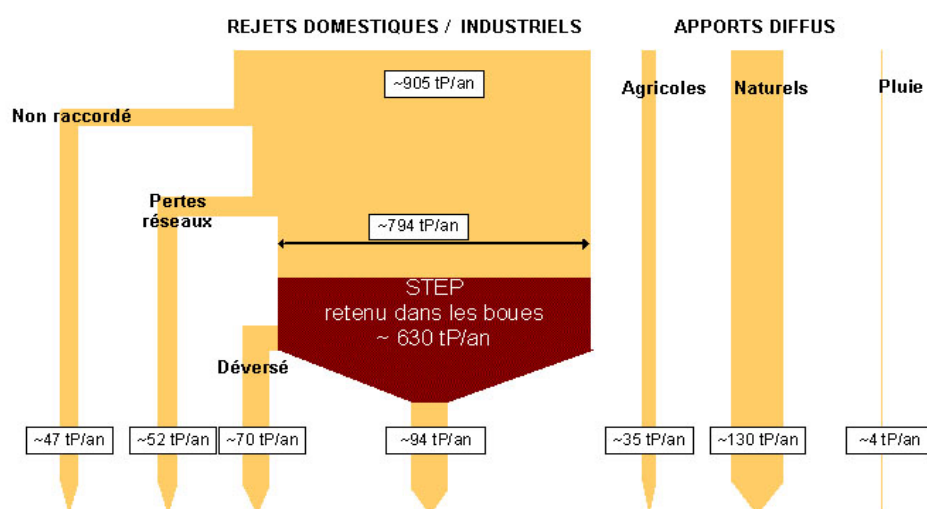


Figure 1: origine des flux de phosphore (source: CIPEL 2002)

Cependant les valeurs indiquées par la figure 2 doivent être prises avec précaution. En effet avec les progrès faits en assainissement, la part de pollution imputée aux foyers diffus ne va cesser d'augmenter.

En définitive, l'agriculture fournit un tiers du phosphore total. La fraction ponctuelle doit faire l'objet d'opérations de mises aux normes des bâtiments agricoles, mais la fraction diffuse doit également être prise en compte. Cela suppose des connaissances approfondies sur les mécanismes et les risques de transfert du phosphore.

c) La pollution diffuse d'origine agricole.

Les pollutions diffuses représentent la somme des pertes des sols d'une région donnée en fertilisants, pertes collectées par le réseau hydrographique superficiel et au niveau d'éventuels aquifères (définition de la CIPEL). Plus simplement, elles sont liées aux précipitations ayant pour conséquence l'érosion et le lessivage des sols (Pilleboue, 1987). Les pertes en phosphore hors d'une parcelle sous forme dissoute et particulaire entraînent une pollution diffuse. La plus grande partie du phosphore est entraînée par érosion (Jordan-Meille, 1994).

La pollution diffuse résulte donc du ruissellement de l'eau sur les sols et de leur érosion lors d'événements pluvieux. Les pertes sont entraînées vers le réseau hydrographique où le phosphore lié aux sédiments sera transféré vers l'exutoire, au fil des crues (Jordan-Meille, 1994). Ces pertes varient selon le mode d'occupation du sol, et de manière globale, on peut considérer que les pertes sur des surfaces naturelles ou sur des prairies permanentes peuvent être faibles, voire négligeables. En revanche elles sont quasi systématiques sur des sols dont les conditions favorisent le ruissellement (pentes fortes, couvert végétal faible ou inexistant...)

Sur les cultures annuelles, le ruissellement varie selon deux paramètres :

- La situation de la parcelle. En effet les risques de transfert sont plus élevés si la parcelle est connectée au réseau hydrographique par le biais d'un fossé, ou lorsque celle-ci reçoit les eaux ruissellées de surfaces urbaines imperméabilisées situées en amont.
- Les différents travaux du sol, qui augmentent les risques de ruissellement s'ils sont mal appropriés (semelle de labour par exemple)

Les risques de transferts sont eux souvent liés aux apports de fertilisants qui, mal gérés au cours de l'année peuvent entraîner de fortes concentrations à la surface du sol engendrant un risque de transfert élevé en cas de fortes précipitations

2) Le contexte lémanique

a) Evolution des taux de phosphore dans le Léman.

La croissance démographique responsable de l'augmentation des rejets domestiques, l'urbanisation ainsi que l'intensification de l'agriculture sur le bassin versant du Léman ont provoqué une augmentation des taux de phosphore dans les eaux du lac, engendrant de nombreux problèmes environnementaux d'utilisation de l'eau (baisse de la diversité biologique, développement des algues vertes, nuisances pour les activités aquatiques...)

Alertés par ces problèmes, la Suisse et la France mettent en place dès 1960 la CIPEL (Commission Internationale de Protection des Eaux de Léman) dont le rôle est d'initier un programme de sauvegarde du lac et de suivre son état. La mise en place de la déphosphatation dans les stations d'épuration (STEP) dans les années 1970 semble peu à peu améliorer le

phénomène. En 1986, les premières actions de la CIPEL dirigées vers la pollution d'origine domestique entraînent l'interdiction des lessives phosphatées et engendrent une amélioration du taux de phosphore dans le lac significative mais non satisfaisante puisque l'objectif est de ramener le taux au taux initial de 1960.

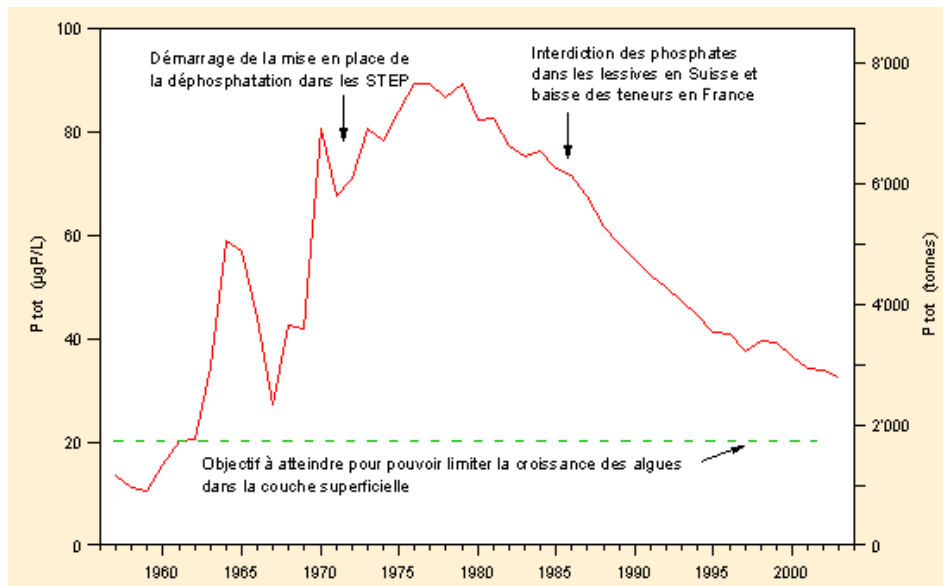


Figure 2: Evolution du taux de phosphore dans le lac Léman (source: CIPEL)

b) Méthodes de lutte et intérêt de la modélisation

Tout le phosphore perdu au niveau des parcelles agricoles n'arrive pas forcément au réseau hydrographique. En effet les prairies situées entre la parcelle et le réseau peuvent retenir le phosphore et les sédiments en provoquant le ralentissement du ruissellement, favorisant ainsi l'infiltration dans les sols. D'autres éléments du paysage comme les lisières de forêts, les marais ou les haies peuvent jouer ce rôle tampon. Ces zones tampons sont tributaires des conditions économiques et de l'aménagement du paysage.

Plusieurs types d'actions peuvent donc être envisagées. Des opérations de sensibilisation aux exploitants les incitant à adopter des pratiques agricoles plus clémentes envers les transferts de pollution (amélioration du travail du sol, fertilisation adaptée, mises aux normes des bâtiments...)

Des actions peuvent également être engagées pour favoriser le maintien et l'installation de bandes herbeuses à rôle tampon et favoriser la restauration de zones naturelles existantes (marais).

Des actions peuvent être menées afin de limiter les perturbations de l'hydrologie locale et c'est l'organisation globale du paysage qu'il faut s'appliquer à mieux gérer.

C'est sur cet aspect qu'intervient la modélisation. En effet cet outil, outre ses capacités à calculer et représenter les processus impliqués dans les phénomènes de pertes et transfert de phosphore, permet également de simuler des scénarios agro-environnementaux faisant ainsi varier les conditions du milieu (occupation du sol, modification du réseau hydrographique...). Il est alors possible de voir l'évolution des phénomènes en fonction des aménagements mis en place et proposer par la suite des opérations à mettre en œuvre pour pallier aux problèmes mis en exergue par le modèle.

Une gestion du bassin versant par les SIG et la modélisation aboutit à une gestion du paysage permettant un ralentissement des circulations et une diminution de la concentration des sources émettrices de phosphore. Cet outil apparaît donc comme un moyen de lutte efficace contre les problèmes de pollution diffuse.

c) Objectifs du stage

C'est sur cet aspect modélisation qu'il m'a été demandé de travailler. L'UMR INRA CARTEL surveille en effet un petit sous bassin versant du Léman depuis une dizaine d'années. Leurs études les ont conduits à appréhender ce bassin comme un ensemble de stocks de composés, contaminants ou non, répartis dans un territoire et susceptibles d'interférer plus ou moins avec les divers types d'écoulements d'eau. Les conditions qui déterminent ces interactions stocks-écoulements constituent «l'état du bassin». Elles dépendent d'une triple dynamique:

- celle qui préside à l'élaboration de ces stocks à la surface des sols, en relation avec les pratiques agricoles et des régulations biogéochimiques ou biologiques,
- celle du fonctionnement hydrique des sols qui conditionne l'époque, les lieux (zones actives) et les modalités (ruissellement..) du transfert initial stocks du sols-eaux (ou émission),
- celle du transport vers et dans le réseau hydrographique, qui s'accompagne localement de rétentions (dans des zones tampons), voire de transformations de la charge polluante, ces deux phénomènes constituant une « atténuation » de la charge transférée alors que d'autres phénomènes rajoutent des sources de contaminants (sédiments, érosion des berges) et de possibilités d'interaction.

C'est ce modèle conceptuel que nous nous proposons de transformer en modèle fonctionnel à tester sur le bassin versant du Mercube. L'objectif au terme du projet est de pouvoir repérer les zones du bassin versant et périodes critiques, pour établir les responsabilités relatives, les potentiels de stockage ou de dissémination. Dans ce cadre et en préalable à la modélisation, la constitution d'un Système d'Informations Géographiques présentant les données spatialisées classiques (plan lithologique, pédologique, mode d'occupation des sols, réseaux hydrographiques...) couplé à un Modèle Numérique de Terrain s'avère indispensable. Dans un deuxième temps, en utilisant le modèle hydrologique SWAT Soil and Water Assessment Tool, des essais de modélisation des transferts de P seront réalisés sur la base d'unité hydrologique définie par le SIG.

Partie 2

Le bassin versant

1) Le choix de la zone d'étude

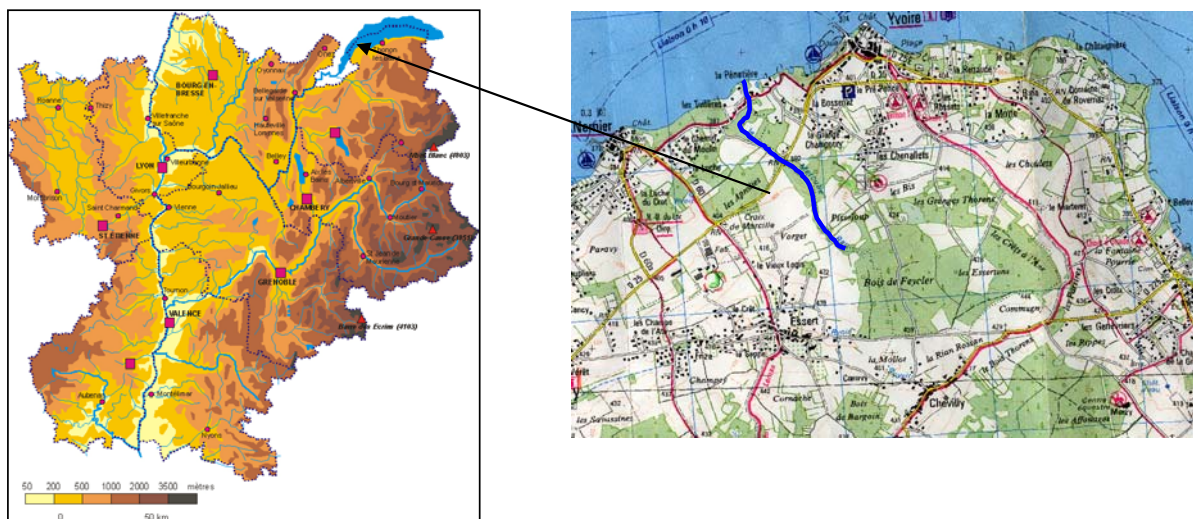
La mise en place de SWAT a été réalisée sur le bassin versant du Mercube en Haute-Savoie, en rive gauche du Léman. Ce site a été choisi pour la mise en place de SWAT car il s'agit d'un bassin versant expérimental observé par l'INRA depuis 1992. De nombreuses données hydrologiques et hydrochimiques sont disponibles et permettront donc les comparaisons entre simulations et observations. De plus, l'assainissement sur le bassin est quasi total, et d'après le bureau Hydrétudes (1999), l'inventaire des rejets montre que la pollution ponctuelle est négligeable. L'essentiel de la pollution est donc d'ordre diffuse agricole.

Ce bassin a, de plus, subi ces 20 dernières années de profondes modifications qui ont entraîné des variations du régime hydrologique du ruisseau. En effet, le drainage des terrains agricoles, l'intensification de la production, et l'urbanisation ont pour conséquences l'augmentation des débits en période de crue, le raccourcissement des temps de transfert des eaux et la déstabilisation du cours d'eau. Il est ainsi apparu primordial de contrôler le régime du cours d'eau et de lutter contre les transferts de phosphore qui ont été favorisés par les conséquences des aménagements (raccourcissement des temps de transferts favorisant le transport du phosphore vers le réseau hydrographique).

2) Caractéristiques physiques du bassin

Le Bassin versant du Mercube, drainé par le ruisseau du même nom se situe entre les communes de Nernier, Yvoire et Messery, communes du bas Chablais proche de Thonon les Bains en Haute-Savoie. Sa taille est de 302 hectares. Malgré sa petite taille, il peut être qualifié de complexe au vu des paramètres physiques qui le déterminent (topographie, pédologie, hydrographie etc...).

Figure 3: Localisation du bassin versant du Mercube (en bleu, à droite, le ruisseau du Mercube)



a) Topographie

Le bassin versant présente un allongement maximal de 2.7 Km d'Est en Ouest. Son altitude varie entre 372 (altitude du lac Léman) et 451 mètres d'altitude. La pente moyenne est de 4% et n'excède jamais les 8 %. Les profils en long réalisés dans les premiers temps où le bassin a été équipé (1998) montrent les unités suivantes(JORDAN-MEILLE 1998) :

- des versants linéaires de pente constantes,
- des versants concaves, situés le long et en aval des vallums,
- des zones plates.

La figure ci-dessous montre une vue 3D réalisée avec l'extension 3D Analyst, lorsque nous possédions celle-ci à titre d'échantillon, lors de l'achat de la licence. On peut voir sur cette vue les trois faciès géomorphologiques décrits plus haut. On reconnaît la ride morainique à gauche (a), une zone plate au centre (b), puis un versant linéaire présentant une pente relativement constante (c). Le facteur d'exagération des altitudes de la vue est de 5.

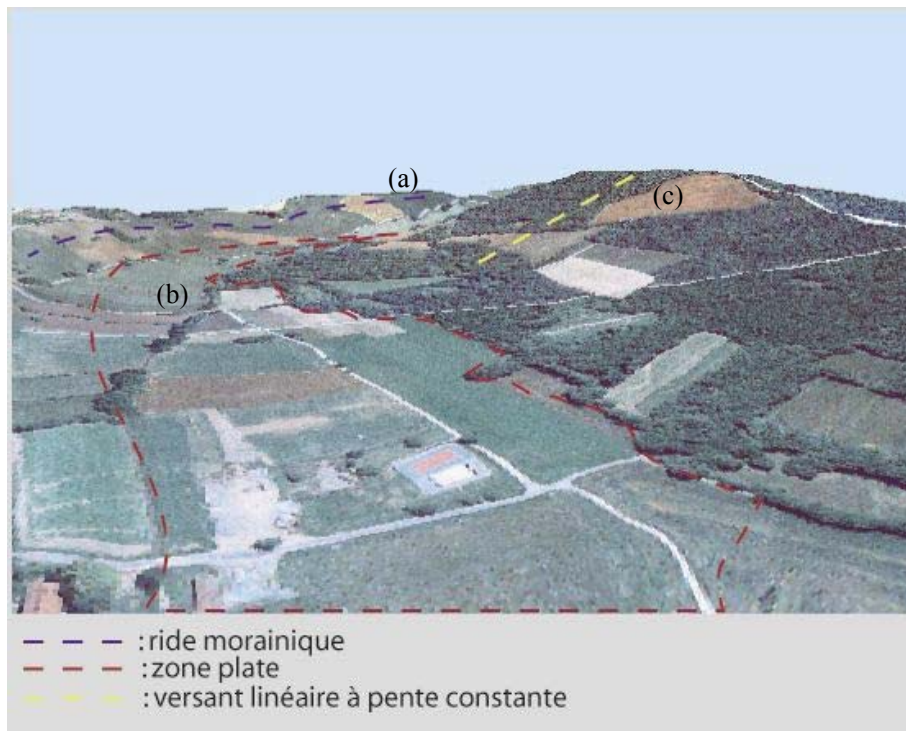


Figure 4: Vue 3D du bassin versant du Mercube (réalisation : RENAUD, 2004)

b) Géologie et pédologie

Trois formations géologiques quaternaires principales, déposées lors de retraits glaciaires, composent le bassin.

- Le Bassin repose sur un socle morainique. Ce dépôt morainique, généralement argileux affleure au niveau des crêtes sud et est du bassin.
- Des dépôts glacio-lacustres ont comblé les fonds de vallons
- Les dépôts fluvio-glaciaires, sableux à graveleux à l'origine de sols filtrants peu sensibles au ruissellement. Peu importants sur le bassin, on en trouve vers l'Est où leur exploitation a cessé dans les années 80.

L'altération de ces différents matériaux est à l'origine des différents types de sols présents sur le bassin. On distingue ainsi sur les rides morainiques, des sols calcaires peu profonds, (rarement plus de 50 cm) très caillouteux.

Des sols plus profonds se développent plus en aval sur les placages fluvio-glaciaires, leur texture est plus argileuse que les précédents. Les sols sains ne présentant pas ou peu de taches d'hydromorphie sont généralement utilisés par les exploitants.

En forêt et à proximité du cours d'eau se forment des sols également profonds, nettement plus argileux que les autres et montrant de nombreuses taches d'hydromorphie. Ces sols fortement gleyifiés³ témoignent d'un excès d'eau. La carte des sols a fait l'objet d'une campagne de terrain intégrée à mon stage. Celle-ci constituant une partie importante de mon travail, est présentée ci dessous. Cette campagne s'est effectuée dans les premières semaines de stage pour disposer rapidement des informations nécessaires au travail. Elle détaille le fonctionnement pédogénétique du bassin puis les étapes conditionnant la distribution des sols ainsi que leur pédogénèse⁴. Après un travail de maillage et d'échantillonnage à la tarière sur toute la superficie du bassin, les grands profils types ont été définis puis décrits afin de réaliser la minute de terrain et digitaliser la carte sur SIG.

³ Gley : horizon formé au niveau des fluctuations de la nappe aquifère. Ces fluctuations créent dans le sol des conditions aérobies et anaérobies. Le fer précipite à ce niveau sous forme ferrique et se signale par une couleur rouille. Dans la partie du profil continuellement en eau, le fer reste à l'état ferreux et se manifeste par une couleur bleue. (Lozet, Mathieu, 1986).

⁴ Pédogénèse : ensemble des processus qui a pour résultat la formation des sols à partir du matériau initial et de la présence de matières organiques. (Lozet, Mathieu, 1986).

Fonctionnement pédogénétique du bassin coupe Est/Ouest

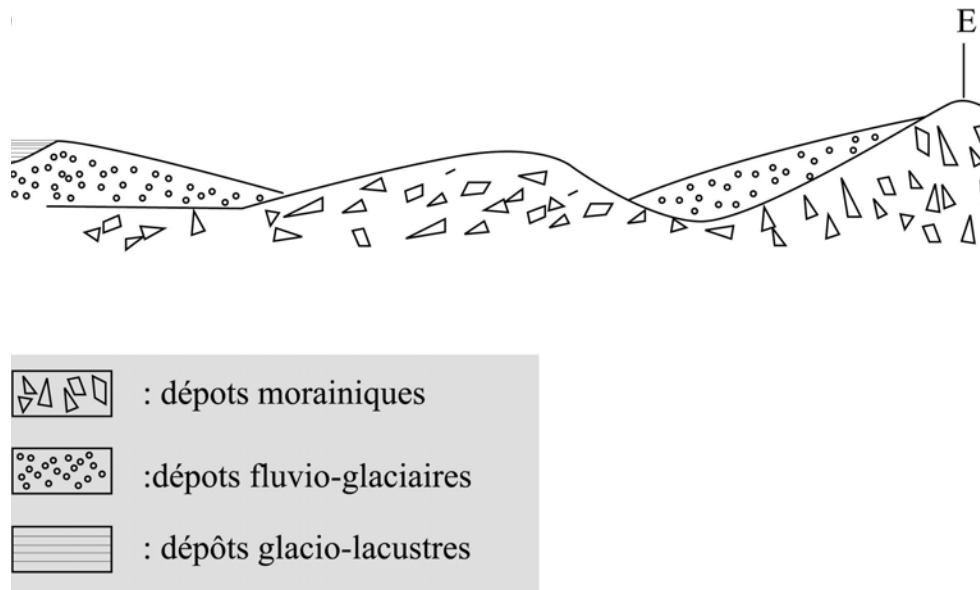
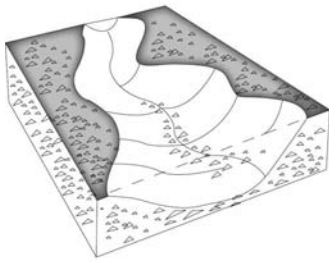


Figure 5: Fonctionnement pédogénétique du bassin versant du Mercube (réalisation :Renaud, 2004).

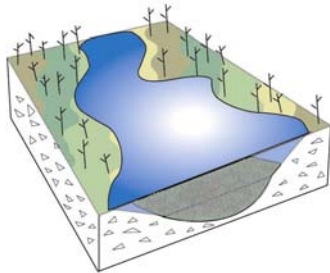
Le retrait glaciaire laisse derrière lui un matériel morainique à la topographie inégale. Dans les vallums formés, des dépôts fluvio-glaciaires se sont installés. Localement, sur ces dépôts fluvio-glaciaires, du matériel témoignant de la présence d'un ancien lac est présent. Ces trois types de matériaux donnent par leur altération trois types de sols. Des sols peu profonds superficiels sur la crête morainique. La faible profondeur s'explique par le fait que la moraine, en constante érosion n'a pas le temps de s'altérer. Dans les sites plus protégés des phénomènes érosifs (en forêt par exemple), la moraine peut s'altérer et donner naissance à des sols plus profonds. Des sols bruns se mettent en place sur les dépôts fluvio-glaciaires. Le degré d'hydromorphie est fonction de la granulométrie, de la présence potentielle d'une nappe, mais aussi de la topographie du substratum héritée des épisodes glaciaires. Enfin dans le matériel fin glacio-lacustre se sont formés des sols profonds très argileux, fortement hydromorphes présentant d'abondantes traces d'hydromorphie (gleys de couleur bleu, taches rouilles...)

Etapes conditionnant la distribution des sols et leur pédogénèse



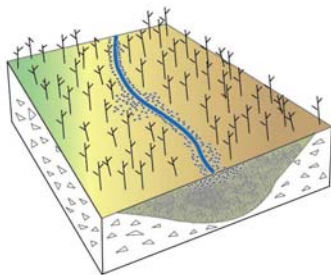
①

Le retrait du glacier rhodanien entraîne l'érosion de la moraine qui forme alors des creux (vallums) et des bosses (crêtes).



②

Localement, au niveau des vallums, des lacs se forment. Ils sont peu à peu comblés par du matériel très fins de type argiles. Les crêtes morainiques s'altèrent et des sols bruns prennent naissance.



③

Le lac est maintenant complètement comblé, un ruisseau s'est installé. A chaque crue, du matériel alluvial est déposé et remobilisé. Les trois matériaux (morainiques, lacustres et alluviaux) sont donc à l'origine de trois types de sols différents. les sols les plus proches de la rivière fortement hydromorphes présentent des éléments grossiers alluviaux avant d'atteindre les argiles lacustres. En s'éloignant du ruisseau, on ne retrouve plus ces éléments grossiers, mais l'on tombe directement sur un matériel très argileux. Plus loin encore, des sols bruns développés sur la moraine apparaissent.

Figure 6: Etapes conditionnant la distribution et la pédogénèse des sols (réalisation : Renaud, 2004).

Carte des sols du bassin versant
du Mercube au 1/5000°

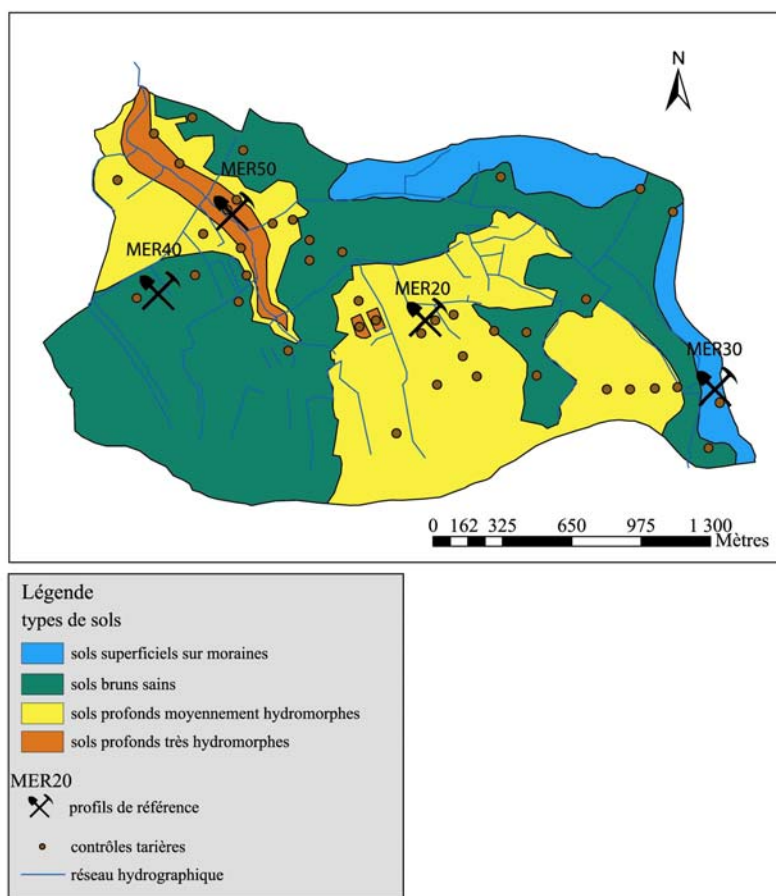


Figure 7: Carte des sols du bassin versant du Mercube (réalisation : Renaud, 2004).

c) Hydrographie

Le réseau hydrographique a fortement évolué ces dernières années. Entre 1995 et 2000 le réseau de fossés s'est fortement développé, modifiant sensiblement les limites du bassin versant. Nous verrons ultérieurement que ceci a posé quelques problèmes lors de la modélisation et de l'extraction du réseau.

Le réseau naturel comporte deux parties distinctes, une partie pérenne, l'autre temporaire, la pente dans la partie pérenne provoque le surcreusement du cours d'eau dans les formations argileuses fluvio-glaciaires et glacio-lacustre. L'érosion des berges atténuée, au fil des crues les plus importantes, le caractère encaissé du cours d'eau (JORDAN-MEILLE 1998).

A l'exutoire, le bassin est équipé afin de recueillir des enregistrements concernant le débit et la chimie des eaux. Les mesures de débit sont effectuées par un limnigraphe à flotteur adjacent à une section en double v jaugée. Ce type de section permet l'enregistrement des débits les plus faibles (0 à 025 l/s) aux débits les plus forts (bien qu'en 2002, une crue exceptionnelle ait emporté toute l'installation !). Le prélèvement automatique des eaux est assuré par une pompe immergée. (Voir annexes)

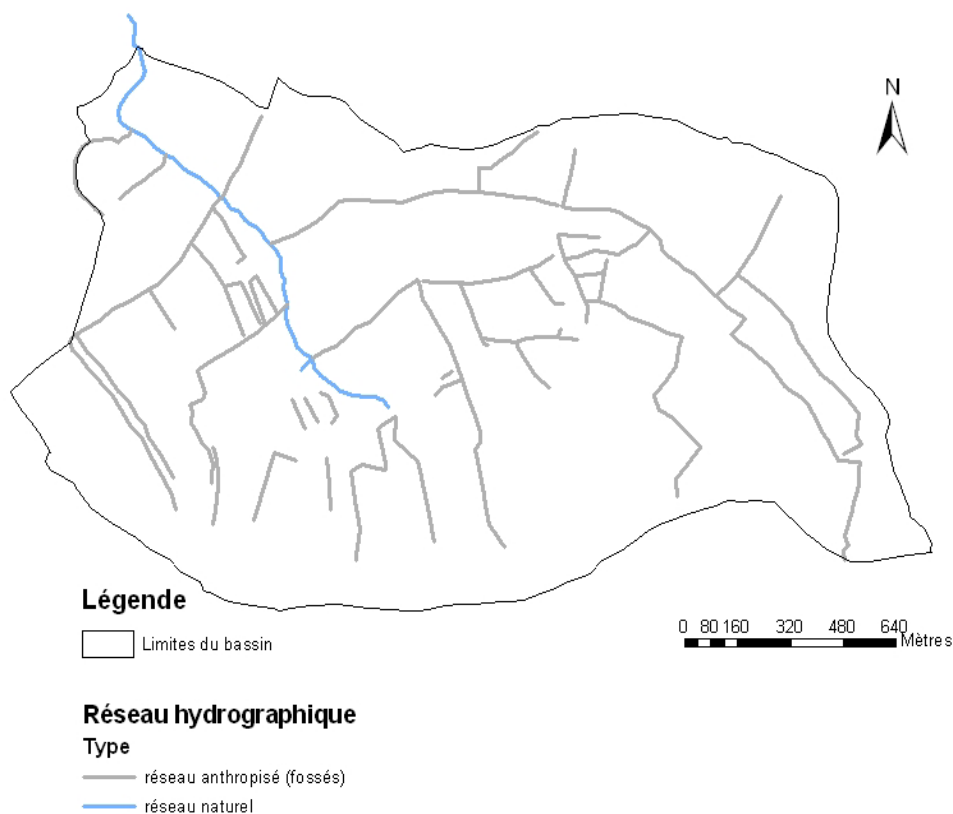


Figure 8 : Réseau hydrographique du bassin versant du Mercube (Renaud, 2004)

d) Occupation du sol

L'agriculture occupe une place importante dans le bassin versant, la figure ci-dessous montre l'occupation du sol pour l'année 2000. On y voit la dominance des cultures céréalières. La surface agricole utile couvre environ 155 ha, soit plus de la moitié de la superficie du bassin, pour un nombre total de 11 exploitants. La zone urbaine représente 22 ha, l'habitat y est en général concentré, sauf en bordure du lac où celui-ci est plus diffus. Une partie de 9 Ha est complètement imperméabilisée par les zones urbaines.

Le reste du bassin (123 Ha) est occupé par la forêt, composée de feuillus et de résineux, celle-ci est propice à la formation de sols lourds favorables à l'hydromorphie. Ces sols sont donc généralement saturés d'eau en hiver.

D'une manière générale, la répartition des sols détermine le mode d'occupation de l'espace (Jordan-Meille 1998), les sols les moins hydromorphes sont généralement utilisés pour la culture céréalière, les sols moins favorables sont laissés aux prairies et aux forêts.

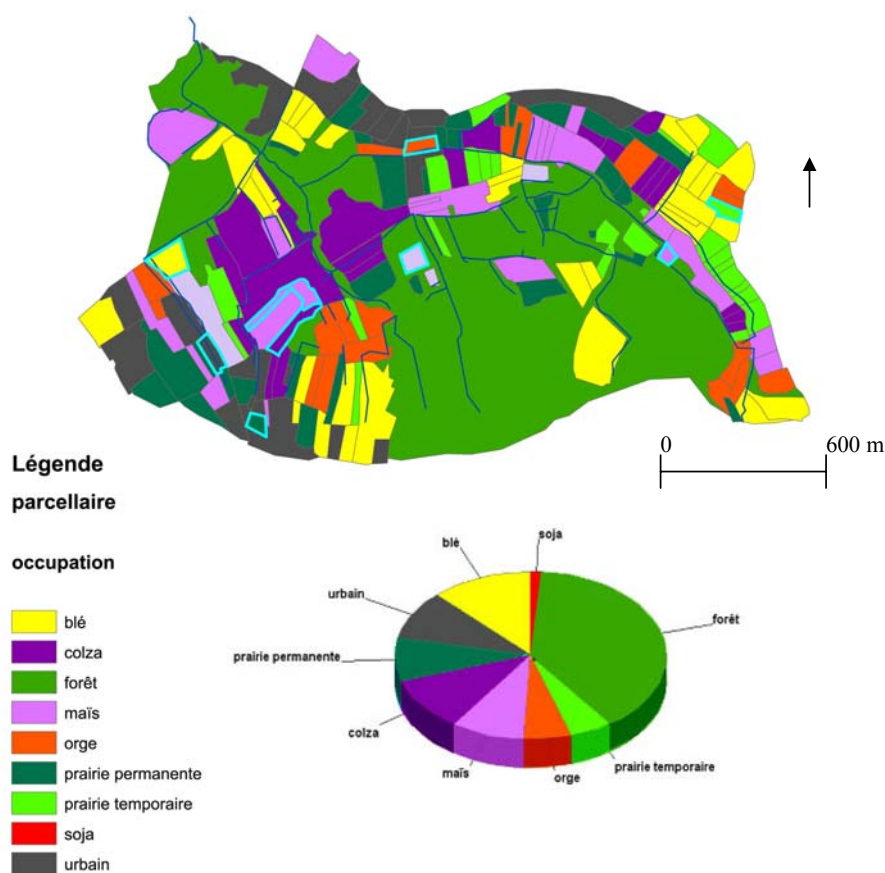


Figure 9 : Occupation des sols du bassin versant du Mercube pour l'année 2000 (source: Bugnet 2000)

Partie 3

Le modèle SWAT

1) Généralités sur les modèles

a) Définitions

Un modèle est « une représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un processus ou d'un système, en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir » (dictionnaire de l'environnement). Les domaines d'applications de ces modèles sont nombreux et variés et peuvent servir autant en économie, qu'en hydrologie.

Ces modèles ont pour but de faciliter la compréhension de phénomènes souvent complexes et au final prévoir et proposer des mesures pour pallier les effets non souhaités induits par ces derniers.

En hydrologie, la modélisation peut avoir une fonction de recherche, où une fois calibré, le modèle permet d'établir des scénarios qui pourront être confrontés aux mesures. Il est également fréquent d'utiliser la modélisation à des fins de prévisions ou encore pour reconstituer des séries de débits possibles dans le cadre de dimensionnement d'ouvrages (déversoir de sécurité de barrages...) mais aussi pour la délimitation de zones inondables (PPRI...).

Au final, ces modèles vont permettre la mise en place de scénarios qui serviront d'aide à la décision pour les acteurs concernés par des projets d'aménagements du territoire ou de mise en place de pratiques agro-environnementales. A l'échelle du bassin versant, les hydrologues ont souvent recours à la simulation des débits par le biais de ces modèles.

b) Différents types de modèles hydrologiques

Le modèle hydrologique d'un bassin versant représente de manière simplifiée le cycle de l'eau sur ce bassin afin d'expliquer la réponse du bassin aux conditions climatiques et physiques auxquelles il est soumis (relation pluie/débit)

Plusieurs types de modèles peuvent décrire ces processus hydrologiques, ceux ci ont été classés par Clarke (1973) et repris par Le Cler en 2004. Ils distinguent :

- **Les modèles conceptuels à base physique** : modèle dans lequel le fonctionnement du bassin est présenté par une analogie, un concept. L'analogie la plus souvent utilisée pour représenter le fonctionnement des sols et des nappes est celle du réservoir dont le débit de vidange dépend du taux de remplissage. Ce sont des modèles qui se basent sur des processus physiques connus. L'ensemble du fonctionnement est un compromis entre une représentation physique précise de certains phénomènes et une représentation plus empirique pour d'autres. Il existe entre les grandeurs mesurables dans la réalité et celles mesurables sur le modèle des rapports de similitude qui peuvent être calculés a priori et qui assurent la transposabilité en vraie grandeur des résultats obtenus sur le modèle. La justification du modèle repose en définitive sur le fait que les mêmes équations régissent les phénomènes en vraie grandeur et en modèle réduit.

- **Les modèles empiriques** sont développés à partir d'expériences en laboratoire ou sur le terrain. C'est le cas par exemple du modèle d'érosion USLE (Universal Soil Loss Equation). Nous verrons d'ailleurs ultérieurement que cette USLE intervient dans SWAT.

Ces deux types de modèles peuvent ensuite être **globaux** c'est-à-dire qu'ils appréhendent le bassin versant comme une seule et unique entité, et tente de reproduire son comportement général. Malheureusement, le modèle global ne tient pas compte de la variabilité spatiale des paramètres régissant les phénomènes comme le ruissellement ou l'érosion et ils ne peuvent donc pas évaluer les effets qu'auront des modifications de l'usage des sols ou de l'utilisation du territoire en général. C'est pourquoi des modèles dits **distribués** ont été mis en place permettant, à l'aide de formules mathématiques plus complexes de représenter la variabilité spatiale des phénomènes agissant sur le bassin. Ce dernier est ainsi découpé en unités afin de prendre en compte l'hétérogénéité des caractéristiques influençant la réponse hydrologique du bassin.

2) Description de SWAT

a) Généralités

Développé par Jeff Arnold pour l'USDA Agriculture research service en 1999, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle conceptuel physique semi-empirique distribué permettant de manipuler et d'analyser de nombreuses données hydrologiques et agronomiques. La version 99.2 du modèle reste couplée pour l'instant avec la version Arcview 3.2 anglophone (affublée de l'extension Spatial Analyst 1.1), bien que des efforts de développement tentent de l'adapter à la plate-forme Arcgis.

Il a été conçu pour de grands bassins versants allant de quelques centaines de km² à plusieurs milliers de km². Il est largement utilisé aux Etats-Unis et dans certains pays européens. SWAT a été validé sur de nombreux bassins dans le monde, c'est le cas par exemple dans l'Indiana où il a été utilisé avec succès pour modéliser les déplacements de pesticides dans un bassin de 250 km². En Europe, il est actuellement utilisé en Allemagne sur le bassin de Dietzhöle ou encore en France, par le CEMAGREF qui évaluent grâce au modèle les risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole dans deux bassins versants des pays de la Loire.

Le couplage avec le SIG permet de gérer des données de type raster, vecteur et alphanumériques. Il facilite et automatise la préparation des données d'entrées, il rend plus convivial la phase d'intégration, de manipulation et le paramétrage des données liées à la simulation. Le paramétrage des données numériques par l'utilisateur et la visualisation des résultats s'effectuent par le biais des formats « .Dbase ». Cependant, les fichiers de sorties sont convertis par SWAT en format ASCII possédant leurs propres structures. Plus d'une centaine de fichiers sont requis pour le bon fonctionnement du modèle : modèle numérique de terrain, pédologie, réseau hydrographique, données climatiques de températures et précipitations, occupation du sol, pratiques agricoles, etc.... De nombreuses valeurs sont

définies par défaut pour des conditions américaines, mais un grand nombre d'entre elles devront être adaptées au contexte français et local.

La partie paramétrage du bassin versant est assez longue, au vu du nombre conséquent de données d'entrées nécessaires. Les traitements décrits comme assez longs (2 heures) par les ouvrages mettant en œuvre le modèle se sont réduits à quelques minutes dans le cas du bassin versant du Mercube étant donnée sa faible taille (près de 10 fois inférieure aux bassin versants les plus petits rencontrés) et du fait qu'il n'y ait pas eu de sous bassins versants créés. La visualisation des résultats se fait essentiellement sous forme graphique à partir de bases de données, mais aussi sous forme cartographique à l'échelle du sous bassin versant.

b) Principes

- L'hydrologie

Comme tout modèle hydrologique, SWAT reproduit le cycle de l'eau sur le bassin versant de manière simplifiée. On peut schématiser le fonctionnement du modèle par trois gros modules principaux qui communiquent entre eux par la circulation d'eau.

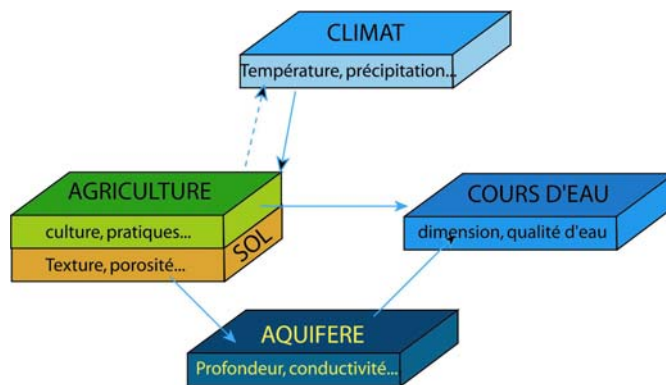


Figure 10: Fonctionnement schématique de SWAT (d'après DUROS 2001)

Le bilan hydrique contrôle les différents processus hydrologiques se déroulant sur le bassin :

$$SW^t = SW + \sum_{t=1}^t (R_i - Q_i - E_{ti} - P_i - Q_{ri})$$

SW^t = contenu final en eau du sol (mm)

P_i = percolation (mm)

SW = eau disponible pour les plantes (mm)

Q_{ri} = débit d'étiage (mm)

R_i = précipitation (mm)

E_{ti} = évapotranspiration (mm)

Q_i = ruissellement de surface (mm)

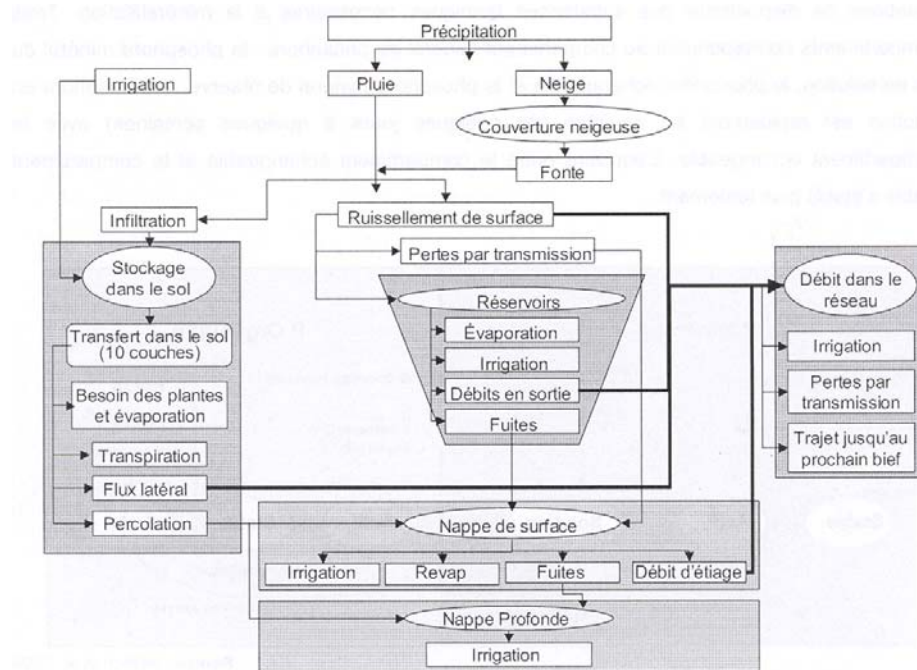


Figure 11: structure hydrologique de SWAT (source Eckard et Arnold 2000)

La figure 10 qui présente la structure hydrologique de SWAT montre les différents processus intrinsèque du bilan hydrique. Ainsi, on peut voir que l'hydrologie est modélisée en deux phases :

Une première phase terrestre qui simule le ruissellement, l'infiltration, l'évapotranspiration (plusieurs algorithmes au choix selon les données disponibles) l'exportation et le transport de sédiments et d'éléments nutritifs vers le réseau hydrographique.

La seconde phase est une phase de transport en rivière qui caractérise le déplacement de ces éléments depuis leur entrée dans le réseau jusqu'à l'exutoire du bassin.

Certains processus décrits dans la figure 11 sont donc modélisés sur des bases déterministes, ils obéissent à des équations physiques, en revanche d'autres sont caractérisés par des relations empiriques ou des fonctions de transfert.

- Le phosphore

En ce qui concerne le phosphore, les processus de transfert sont décrits dans la figure ci-dessous. Le phosphore minéral est décomposé en trois compartiments : le phosphore minéral du sol en solution, le phosphore échangeable et le phosphore minéral de réserve.

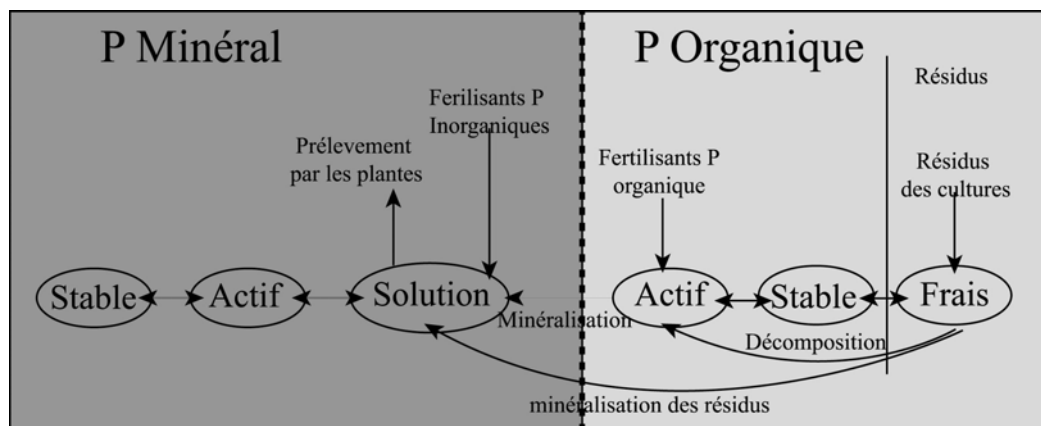


Figure 12 : Processus de transfert de phosphore dans le sol modélisés par SWAT

(source : Neitsch et al. 2002)

- Spatialisation des processus

Afin de prendre en compte les hétérogénéités du milieu, et mieux modéliser les différents comportements des processus, SWAT va spatialiser les types de réponses, c'est-à-dire que le modèle va calculer la valeur quantitative des différents processus sur chaque unité spatiale.

L'unité de base du calcul est la HRU (Hydrological Response Unit). Cette discrétisation spatiale en sous unités correspond à la combinaison d'un sous bassin versant (unique dans le cadre de notre projet) d'un type de sol et d'un type d'occupation dont les paramètres vont influencer sur les phases du bilan hydrique (ruissellement, infiltration, évapotranspiration...).

Une HRU aura donc un comportement hydrologique propre et homogène. Les différents flux (eaux, sédiments, phosphore) sont donc calculés sur la base de cette unité puis sommés pour fournir une valeur globale à l'exutoire du bassin. Notons qu'il n'y a pas de moyen de visualiser les HRU dans cette version de SWAT. Cette étape passe par l'utilisation de l'assistant de géo-traitement qui permet d'effectuer les intersections nécessaires entre les couches de sols et d'occupation du sol.

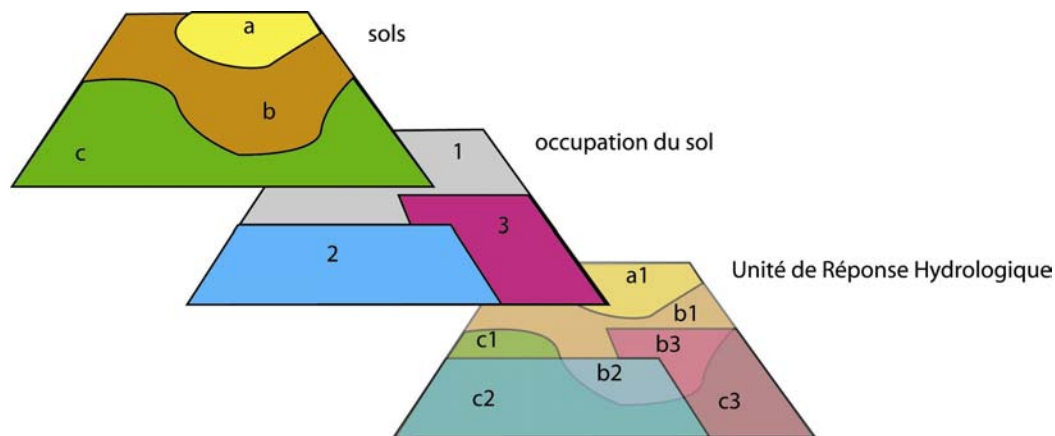


Figure 13: Principe de délimitation des HRU (Renaud, 2004, d'après Duros 2002)

- Calibration et validation du modèle

La phase finale de modélisation consiste ensuite à calibrer le modèle, c'est à dire à modifier certains paramètres pour obtenir, dans un premier temps la meilleure corrélation possible entre les débits simulés et les débits observés dans le cas d'un modèle hydrologique, puis selon la problématique tenter de faire concorder les valeurs d'érosion, ou dans le cas du projet les valeurs de phosphore au niveau de l'exutoire du bassin. La détermination des paramètres du modèle s'effectue par itération (tâtonnement par essais et erreurs), bien que les différentes réponses données par le modèle donnent toujours une idée des paramètres sur lesquels il faut influencer.

Partie 4 :

Paramétrage des données d'entrée et mise en œuvre du modèle

1) Les données nécessaires au fonctionnement de SWAT

a) Topographie

La précision et la validité des Modèles Numériques de Terrain (MNT) dépendent du mode d'acquisition de l'information, de la variabilité locale de l'altitude et des méthodes d'interpolation utilisées pour générer le MNT. L'évaluation de la qualité du MNT est délicate car elle suppose une référence qui permettrait une comparaison. Or souvent, la référence est un autre MNT lui même perturbé.

Le (MNT) est obtenu par le biais de la BD alti de l'IGN pour le département de la Haute Savoie. La précision en z de ce produit se situe entre 1 et 3 m selon ses concepteurs. Le MNT présente une résolution de 50 m. Ceci implique donc que chaque maille de 50 mètres de côté est caractérisée par une altitude moyenne. Son système de projection géographique est le Lambert II. Chaque point de la maille possède trois informations X, Y et Z. Ouvert au format Access, une requête permet de délimiter la zone souhaitée en imposant par une requête les latitudes et longitudes minimales et maximales de la zone. Une fois ciblés, les points de la zone doivent être interpolés afin que chaque pixel de la zone d'étude soit renseigné d'une valeur d'altitude.

La méthode d'interpolation a été choisie selon l'expérience mise en œuvre par DUROS en 2002. Celle ci consiste à essayer plusieurs méthodes d'interpolation et déterminer laquelle est la plus efficace dans le contexte local. Pour cela, le réseau hydrographique de la zone est digitalisé à partir de la carte au 1/25 000^e de l'IGN. On extrait ensuite un réseau à partir du MNT et l'on compare la corrélation entre le réseau digitalisé et le réseau extrait du MNT. La comparaison est réalisée en créant une zone tampon de 20 mètres autour du réseau hydrographique digitalisé, puis en intersectant cette zone tampon avec le réseau extrait du MNT. On peut alors estimer la corrélation en regardant les valeurs du linéaire du réseau réel avec le linéaire du réseau extrait.

Deux techniques d'interpolation ont été testées. La technique du Krigeage⁵ basée sur des méthodes de géostatistiques et la méthode IDW⁶ (Inverse Distance Weight). Les autres techniques n'ont pas été retenues pour le test car elles n'avaient pas présenté d'assez bons résultats lors de l'expérience de DUROS.

⁵ Les techniques d'interpolation fondées sur des méthodes géostatistiques sont appelées krigeage. La géostatistique a comme objectif d'étudier les propriétés statistiques des variables distribuées dans l'espace. les techniques géostatistiques permettent de mesurer la corrélation entre des données liées à l'espace et donc prédire des valeurs de points non renseignées. (Joliveau 2003)

⁶ Méthode d'interpolation par pondération par la distance inverse : Cette méthode permet d'estimer la valeur d'un point non renseigné sous la forme de la somme des valeurs de ses voisins corrigée par l'inverse de la distance à ses voisins. Ces méthodes sont des interpolateurs exacts, en ce sens où les valeurs des points échantillonnés sont préservées. (Joliveau 2003)

La technique d'interpolation retenue au final a été celle de la pondération par la distance inverse. Cette technique permet d'estimer la valeur d'un point inconnu en fonction de la distance qui le sépare d'autres points connus. La valeur du point estimé subira d'autant plus l'influence des points connus qu'ils seront spatialement proches. La valeur de la corrélation entre les deux réseaux après la création de la zone tampon a atteint 65 % contre 61 % pour les techniques par krigeage. Cette valeur peut apparaître assez faible, ceci est dû au fait que les variations topographiques sont peu marquées et que bon nombre d'écoulements sont dus non pas à la nature du terrain mais à des modifications anthropiques.

b) Hydrographie

Etudié depuis plus d'une dizaine d'année, le bassin versant a fait l'objet d'une étude hydrologique menée par le bureau Hydrétudes qui s'est chargé de relever et de cartographier l'emplacement et la topographie du cours d'eau naturel. La partie de réseau anthropisé (réseau de fossé) a été repérée au fil du temps par les techniciens de l'INRA et reportée sur la carte IGN au 1/25 000°. Certaines modifications relatives à la délimitation du bassin versant ont été apportées par des techniciens afin de déterminer les nouvelles directions des écoulements dans certaines zones où de nouveaux fossés avaient récemment été creusés. Ces cartes ont été scannées, référencées puis digitalisées en vue de leur intégration dans le modèle.

c) Pédologie

L'obtention de la carte des sols du bassin versant a fait l'objet d'une étude spécifique étant donné le manque d'information à ce sujet. J'ai donc mené une campagne de terrain visant à cartographier les sols de la zone d'étude. Représentant une partie importante de mon travail, le détail de la mission et les résultats ont été inscrits dans le rapport, dans la présentation du bassin versant (voir :II. Géologie et pédologie.). Mes minutes de terrain réalisées après sondages à la tarière et description des profils de référence ont été scannées et géoréférencées puis digitalisées et renseignées dans le SIG. Les échantillons de sols ont été envoyés au laboratoire d'analyse INRA d'Arras où des données de granulométrie, de carbone organique du sol et de pH ont été demandées afin de remplir en temps voulu les tables utilisées par SWAT pour le calcul des équations figurant les différents processus (hydrologiques, transports de sédiments...). Les résultats des analyses et les descriptions des profils de référence sont disponibles en annexes.

d) Occupation du sol et pratiques agricoles

La carte d'occupation des sols a été extraite d'un rapport réalisé par Bugnet, présentant la cartographie et l'occupation du sol dans le bassin pour l'année 2000. Les cartes disponibles sur support papier ont été scannées puis géoréférencées pour être ensuite numérisées et renseignées par le biais du SIG. Les données concernant les pratiques agricoles ont été obtenues par deux biais. Les types de rotations affectées aux parcelles, les types et doses de fertilisants appliqués ont été extraits d'enquêtes menées par Prieur Drevon en 2002 et consignées dans un rapport de la chambre d'agriculture de Haute-Savoie. Les paramètres physiques de certaines cultures (taux de couverture au sol, rendement...) qui ne figuraient pas dans les tables par défaut de SWAT ont été renseignés après des discussions avec le conseiller

agricole de la chambre d'agriculture, lequel nous a également renseigné sur les calendriers agricoles de chaque culture

e) Données climatiques

L'exécution de SWAT demande diverses données climatiques concernant la zone d'étude. cinq types de paramètres sont prises en compte par le modèle :

- précipitations journalières sur la durée de la simulation,
- éclaircissement solaire,
- vitesse du vent,
- humidité relative.

Les trois premières données sont fournies par la station météo de la station biologique se trouvant à Thonon (coordonnées Lambert II étendu : X=916 651.53 Y=260 309.83). Les valeurs d'humidité relatives sont simulées par le modèle.

Cette station se trouve à un peu plus d'une vingtaine de kilomètres à vol d'oiseau du bassin versant, et l'on peut regretter le fait de ne pas avoir eu accès à des données provenant d'une station météo plus proche. Hélas, les tarifs prohibitifs des données nous ont contraints à nous contenter de celles déjà en notre possession.



Figure 14: localisation de la station météo fournissant les données au modèle SWAT

2) Les différentes étapes de la mise en œuvre de SWAT

a) Discrétisation spatiale

La discrétisation spatiale est la première étape à effectuer pour faire tourner le modèle. Elle consiste à extraire à partir du MNT les limites du bassin versant du Mercube ainsi que son réseau hydrographique. Dans SWAT, la procédure de délimitation est automatisée la fenêtre guidant les opérations successives à mettre en place se présente ainsi :

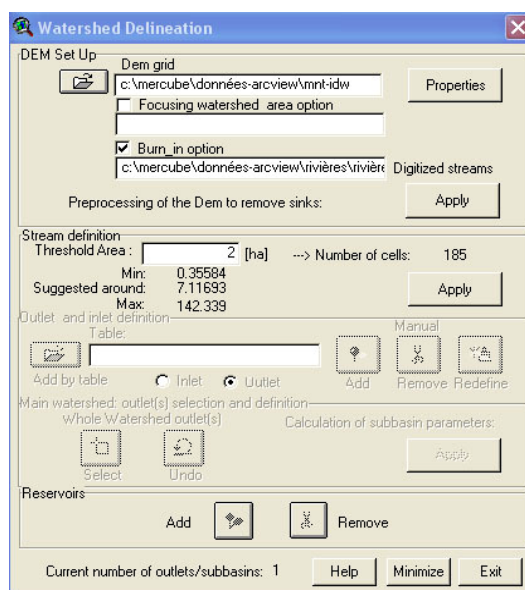


Figure 15: Fenêtre de délimitation du bassin versant et du réseau hydrographique

La première chose à faire est d'indiquer l'emplacement du MNT que l'on veut utiliser pour la délimitation. L'extraction des limites est alors automatique et utilise une méthode classique mettant en œuvre les traitements de l'algorithme (D8) de Jenson et Domingue (1988). Ce traitement est réalisé en cinq étapes détaillées :

- Comblement des points bas et calcul des pentes (figure 16)

Cette étape est un pré-traitement visant à effacer l'effet de puits dû aux imperfections du MNT. En effet, localement, sur la grille du MNT des points bas (la valeur d'altitude du point est inférieure à tous ses voisins) peuvent empêcher l'écoulement de l'eau et fausser le réseau hydrographique. Le modèle procède à la localisation des cellules ayant une valeur plus faible que tous leurs voisins et leurs applique la valeur minimale des voisins. Le calcul des pentes est obtenu en estimant la variation d'altitude entre les cellules voisines

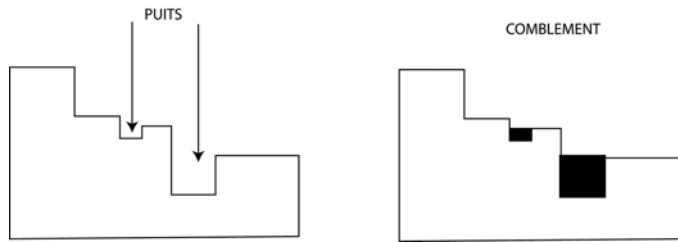


Figure 16: Comblement des puits du MNT

- **Détermination des directions d'écoulement** (figure 17 a)

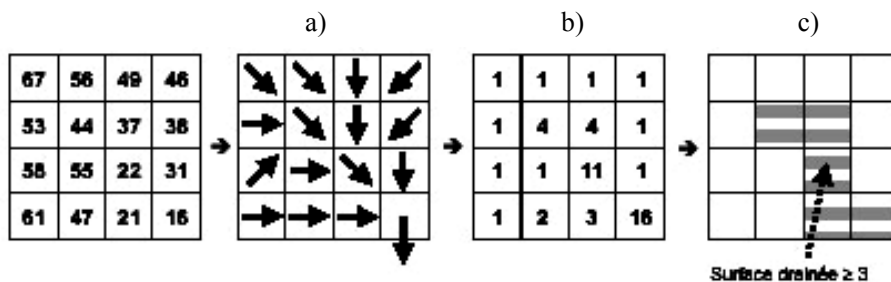
Le calcul des pentes permet ensuite de calculer la direction des écoulements selon la direction de la plus forte pente déterminée. « L'algorithme D8 considère les directions d'écoulement suivant un flux unidirectionnel en huit connexités, en prenant en compte les huit cellules voisines du point considéré » (Charleux-Demargne 2001). Ensuite, il lui affecte un code selon la position relative de la cellule ayant l'altitude la plus faible. Une matrice de direction d'écoulement est ainsi obtenue.

- **Calcul des surfaces drainées** (figure 17 b)

A partir de la matrice des écoulements, un calcul des surfaces drainées va être effectué. Chaque pixel du MNT se voit affubler du nombre de pixel situé en amont selon les directions d'écoulement. Ainsi, pour un pixel donné la valeur des pixels situés en amont va déterminer l'importance de la zone drainée.

- **Extraction automatique du réseau hydrographique** (figure 17 c)

Pour déterminer enfin où va s'écouler le réseau hydrographique, la méthode présentée utilise un seuil d'apparition de l'eau, ou surface drainée critique. Un pixel du MNT est considéré comme une rivière s'il dépasse un certain seuil fixé par l'utilisateur (threshold area).



MNT directions d'écoulement surface drainée réseau hydrographique

Figure 17 : Méthode d'extraction du réseau hydrographique par l'algorithme D8

(Source: Charleux Demargne 2001)

Cette méthode apparaît satisfaisante pour l'extraction du réseau naturel. Malheureusement, le MNT ne peut pas déterminer où se situe le réseau anthropique et ne peut donc pas prévoir l'écoulement dans les fossés. Pour pallier cela, SWAT possède une option nommée burning option. Elle permet à l'utilisateur de superposer sur le MNT un réseau hydrographique préalablement digitalisé (dans notre cas celui relevé par les techniciens de l'INRA prenant en compte l'essentiel des fossés du bassin). Une fois superposé au MNT SWAT va « gratter » les cellules d'altitude où une partie du réseau hydrographique est présent. L'altitude devenant moindre l'écoulement va être forcé lors de l'extraction du réseau, et apparaître en meilleure adéquation avec la réalité du terrain.

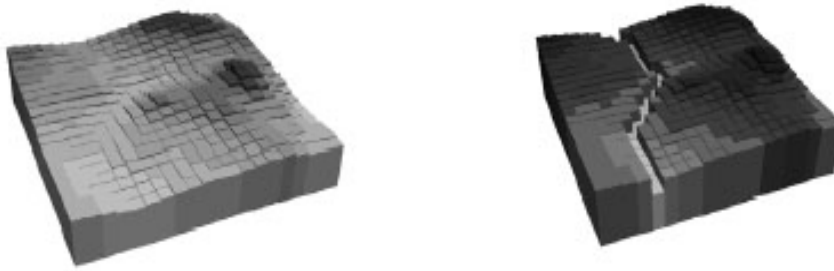


Figure 18: Représentation en perspective du MNT avant et après l'opération de "grattage"

- Détermination des limites du bassin versant

L'utilisateur doit d'abord choisir un pixel exutoire (outlet). A partir de ce pixel et de la matrice de direction des écoulements, le SIG va déterminer quels sont les pixels situés en amont de l'exutoire qui vont se diriger vers le pixel de sortie. Les bassins obtenus correspondent aux bassins versants topographiques puisque seule l'information altitude est utilisée. Notre zone d'étude n'étant pas karstique ce type de délimitation apparaît suffisant.

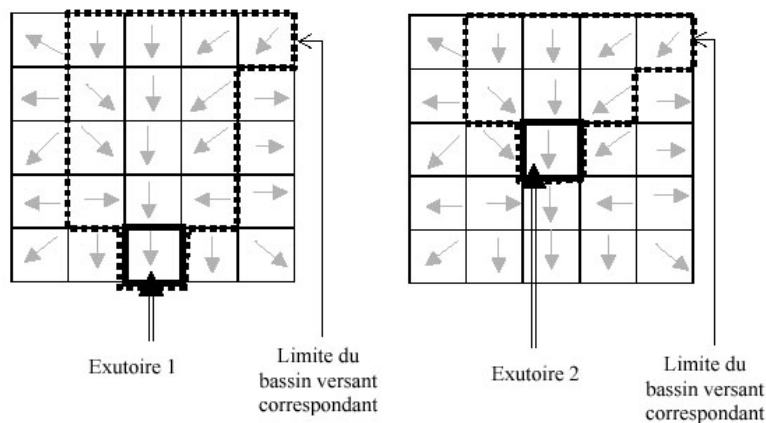


Figure 19: Méthode d'extraction des limites du bassin versant (source: Payraudeau 2002)

Le traitement du MNT par l'algorithme D8 a abouti en premier lieu à la création de plus de 50 sous bassins. Ce grand nombre de sous bassin est dû au fait de la petite taille de bassin versant qui a demandé de positionner un seuil de drainage très faible pour obtenir un chevelu en adéquation avec la réalité. Ce seuil faible a engendré la création de nombreux biefs. A chaque intersection de portion de cours d'eau le modèle a placé un exutoire potentiel (outlet), et par conséquent créé un sous bassin. La quasi totalité de ces sous bassins étant d'une très petite taille, leur surface était insuffisante pour mettre en œuvre la spatialisation des données sols et occupation. Ceci avait pour conséquence de faire « crasher » le modèle, et je me suis donc résolu à ne garder qu'un exutoire, correspondant à l'exutoire principal présent sur le terrain. Ainsi mon bassin n'a pas été découpé. D'ailleurs au fil de mes lecture bibliographiques, je me suis aperçu que la taille de mon bassin correspondait environ à la taille minimale des sous bassins. La moindre division de mon bassin aurait donc entraîné la faillite de la simulation.

L'extraction du réseau hydrographique est d'une importance capitale pour le bon déroulement de la simulation, aussi il est très important de prendre des précautions et d'être attentif lors de cette étape. La qualité du MNT est capitale pour la qualité de l'extraction. La comparaison entre le bassin issu du MNT et celui dont les limites ont été reportées sur la carte (qui ne sont pas toujours fiables à 100% et qui évoluent sans cesse) peuvent donner une idée de la qualité de l'extraction. La différence entre leurs superficies montre une différence de 6 ha soit un peu moins de 2 % de la superficie. Cette différence est certainement due au fait que l'interpolation de la grille de points de la BD alti n'est pas complètement efficace et qu'elle est un peu biaisée par le fait que les pentes du bassin soient très faibles.

Une amélioration de la résolution du MNT et l'établissement d'une méthode plus efficace que la « burning option » permettrait à coup sûr une extraction plus fine du réseau et par conséquent une meilleure simulation des débits à l'exutoire.

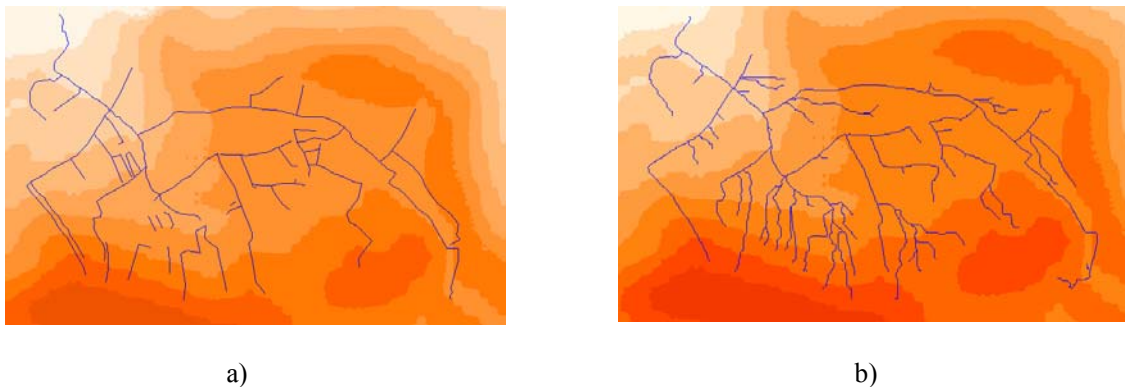


Figure 20: Comparaison entre le réseau hydrographique digitalisé (a) et le réseau extrait du MNT (b)
(Renaud, 2004)

b) Intégration des données sol et occupation du sol

Une fois le réseau hydrographique déterminé et les limites du bassin versant extraites, SWAT nous propose ensuite d'intégrer les données sols et les données d'occupation du sol. La fenêtre permettant l'intégration des données se présente ainsi :

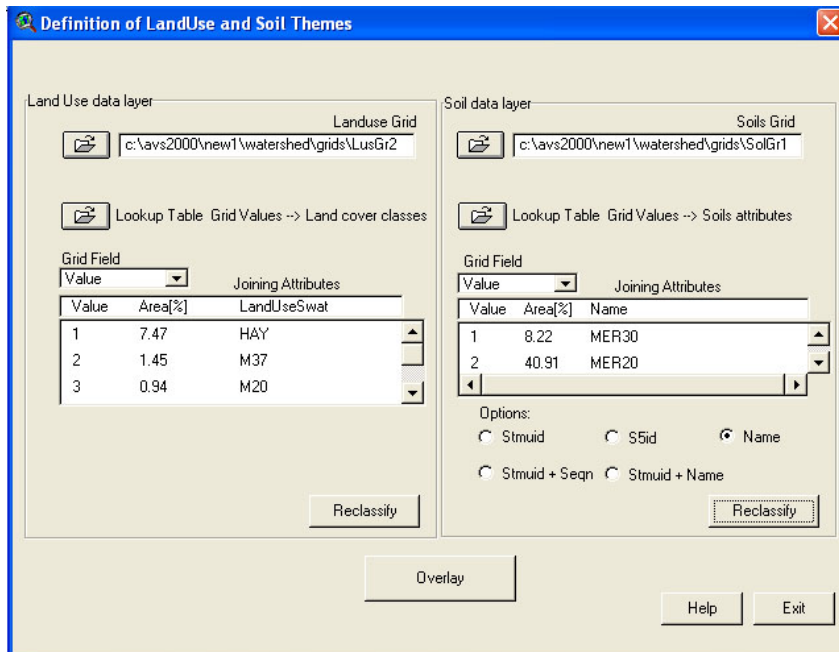


Figure 21: Fenêtre permettant l'intégration des données d'occupation et sols

- Les sols

L'interface présentée ci-dessus permet une acquisition des données sols aisée. L'utilisateur indique l'emplacement de la couche de sol au format « shape » qu'il a préalablement digitalisée en prenant soin de toujours la présenter dans le même système de coordonnées. L'utilisateur précise le champ de la table attributaire qu'il veut voir exprimé (dans notre cas le type de sol), puis le logiciel se charge de découper la couche de sol par les limites du bassin précédemment établies (Clipping).

Il faut ensuite établir la correspondance entre les types de sols et la table (.sol) de SWAT où sont enregistrées les valeurs des paramètres utilisés par le modèle (nombre d'horizons, profondeur, capacité en eau, granulométrie ...). Des tables par défaut sont déjà présentes dans SWAT et concernent des types de sols américains, il a donc été nécessaire au préalable de remplir ces tables et affecter les valeurs données par nos analyses aux différents paramètres. Notons qu'il est possible d'importer des tables réalisées hors du contexte SWAT selon une structure que le modèle est capable de supporter. Cette méthode est avantageuse

lorsqu'il y a un grand nombre de sols sur le bassin. Une saisie par le biais d'un formulaire peut donc faire gagner un temps précieux. Dans notre cas, en présence de seulement cinq types de sols sur notre bassin, il est plus rapide de remplir directement les tables SWAT préétablies.

De plus SWAT s'est avéré très « sensible » aux tables .dbf importées de l'extérieur, et il était souvent plus prudent de les réaliser à partir des tables déjà présentes. La table des sols (user soils) se présente ainsi :

By Soil		By Layer	
SNAM	MER20	SOL_Z	200.00 [mm]
NLAYERS	3 [1 to 10]	SOL_BD	1.10 [g/cm3]
HYDGRP	B [A, B, C or D]	SOL_AWC	0.50 [mm/mm]
SOL_ZMX	25.00 [mm]	SOL_K	640.00 [mm/hr]
ANION_EXCL	0.010 [fraction]	SOL_CBN	1.76 [% soil weight]
SOL_CRK	0.000 [m3/m3]	CLAY	20.20 [% soil weight]
TEXTURE		SILT	58.50 [% soil weight]
		SAND	21.30 [% soil weight]
		ROCK	5.00 [% total weight]
		SOL_ALB	0.10 [fraction]
		USLE_K	0.25 [0.013 t m ² hr/(m3 t cm)]
		SOL_EC	0.00 [dS/m]

Figure 22: Table SWAT concernant les sols

- L'occupation du sol

De la même manière que pour les sols, la couche (.shp) d'occupation du sol doit être indiquée à l'interface ainsi que le champ de la table attributaire que l'on souhaite voir s'afficher, puis le logiciel se charge du découpage de la couche. La correspondance doit être établie à nouveau avec une table des cultures de SWAT. A partir de là, une méthode un peu particulière a été mise en place.

L'occupation des sols n'étant pas un état figé du parcellaire, les différents types d'évolution des parcelles (rotations propres à chaque exploitant) vont avoir une incidence sur le comportement hydrologique de la parcelle. En effet, prenons l'exemple d'une parcelle de maïs. Celle-ci n'aura pas le même comportement hydrologique au cours du temps si elle est suivie l'année d'après par une année de jachère ou par une autre année de maïs.

Afin de prendre en compte et de spatialiser l'évolution de chaque parcelle selon le type de rotations effectuées par les exploitants, j'ai mis en place un système de code pour chaque parcelle. Le tableau ci-dessous présente les différents codes mis en place.

Il est cependant regrettable que l'on ne puisse pas exprimer le fait qu'une parcelle de maïs de 10 ha peut être divisée l'année d'après en 5 ha de maïs et 5 ha de prairie, les parcelles sont obligatoirement tenues d'évoluer du tout au tout.

propriétaire	rotations	id-swat	année 1	année 2	année 3	année 4	année 5	année 6	année 7
BA	Pt3-B-B-O-M	MER1	Pt	Pt	Pt	B	B	O	M
		MER2	Pt	Pt	B	B	O	M	Pt
		MER3	Pt	B	B	O	M	Pt	Pt
		MER4	B	B	O	M	Pt	Pt	Pt
		MER5	B	O	M	Pt	Pt	Pt	B
		MER6	O	M	Pt	Pt	Pt	B	B
		MER7	M	Pt	Pt	Pt	B	B	O
OV	M-M-B-B-O-C-B								
		MER8	M	M	B	B	O	C	B
		MER9	M	B	B	O	C	B	M
		MER10	B	B	O	C	B	M	M
		MER11	B	O	C	B	M	M	B
		MER12	O	C	B	M	M	B	B
		MER13	C	B	M	M	B	B	O
		MER14	B	M	M	B	B	O	C
LG	S-B-B-O-M-M	MER15	M	M	B	B	O	C	B
		MER16	M	B	B	O	C	B	M
		MER17	S	B	B	O	M	M	S
		MER18	B	B	O	M	M	S	B
		MER19	B	O	M	M	S	B	B
		MER20	O	M	M	S	B	B	O
RM	S-C-B-O	MER21	M	M	S	B	B	O	M
		MER22	M	S	B	B	O	M	M
		MER23	S	C	B	O	S	C	B
		MER24	C	B	O	S	C	B	O
MB	Pt3-B-B-O-S	MER25	B	O	S	C	B	O	S
		MER26	O	S	C	B	O	S	C
		MER27	Pt	Pt	Pt	B	B	O	C
		MER28	Pt	Pt	B	B	O	C	Pt
		MER29	Pt	B	B	O	C	Pt	Pt
		MER30	B	B	O	C	Pt	Pt	Pt
GC	S-C-B-M-Pt-Pt	MER31	B	O	C	Pt	Pt	Pt	B
		MER32	O	C	Pt	Pt	Pt	B	B
		MER33	C	Pt	Pt	Pt	B	B	O
		MER34	S	C	B	M	Pt	Pt	Pt
		MER35	C	B	M	Pt	Pt	Pt	S
		MER36	B	M	Pt	Pt	Pt	S	C
MM	B-C-M-Pt2-O-S	MER37	M	Pt	Pt	Pt	S	C	B
		MER38	Pt	Pt	Pt	S	C	B	M
		MER39	Pt	Pt	S	C	B	M	Pt
		MER40	Pt	S	C	B	M	Pt	Pt
		MER41	B	C	M	Pt	Pt	O	S
		MER42	C	M	Pt	Pt	O	S	B
MD	Pt-M	MER43	M	Pt	Pt	O	S	B	C
		MER44	Pt	Pt	O	S	B	C	M
		MER45	Pt	O	S	B	C	M	Pt
		MER46	O	S	B	C	M	Pt	Pt
		MER47	S	B	C	M	Pt	Pt	O
		MER48	M	Pt	M	Pt	M	Pt	M

Tableau 1 :code rotation des types de cultures du Mercube (Renaud, 2004)

Pt= prairie temporaire, C= colza, M= maïs, B= blé, O= orge, s= soja

Le conseiller agricole m'ayant fourni les types de rotations de chaque agriculteur et la localisation de chacune de leur parcelle présente sur le bassin, et en se basant sur l'occupation du sol de 2000 de Bugnet, il a été possible de mettre en place ce code. Chaque code prenait les paramètres de la rotation de tête et gardait un identifiant propre. Ainsi deux parcelles de maïs en 2000 n'évoluant pas de la même manière allaient pouvoir être distinguées pour ultérieurement préciser les pratiques culturales mises en place.

Les tables de cultures de SWAT (land cover/plant growth) possèdent en tout trente deux paramètres exprimant le comportement de la plante et ses caractéristiques physiologiques au cours de l'année culturale (taux de couverture, hauteur, profondeur des racines, rendement escompté...). Tous ces paramètres entrent en compte dans les différents calculs effectués par le modèle (ruissellement, évapotranspiration...).

Dans ce cas, là encore il est possible d'importer des tables préalablement structurées dans le cas par exemple où les tables d'un type de culture ne figureraient pas dans les tables présentes par défaut lors de l'installation du modèle. Dans notre cas toutes les cultures du bassin étaient déjà intégrées dans SWAT exception faite du colza. Les paramètres agronomiques de ce dernier ont été discutés avec le conseiller agricole, et remplis directement dans SWAT. La correspondance à effectuer pour les autres cultures a été rapide puisque les tables existaient déjà.

Crop Name	Parameter	Value	Unit
colza	CPNM	COLZ	[4 character]
	IDC	Cold season annual	
	BIO_E	45.00	[(kg/ha)/(MJ/m²)]
	HVSTI	0.70	[(kg/ha)/(kg/ha)]
	BLAI	9.00	[m²/m²]
	FRGRW1	0.80	[fraction]
	LAIMX1	0.05	[fraction]
	FRGRW2	1.00	[fraction]
	LAIMX2	0.95	[fraction]
	DLAI	0.50	[heat units/heat units]
	CHTMX	0.90	[m]
	RDMX	1.30	[m]
	T_OPT	18.00	[°C]
	T_BASE	0.00	[°C]
	CNYLD	0.0250	[kg N/kg seed]
	CPYLD	0.0022	[kg P/kg seed]
	BN1	0.0663	[kg N/kg biomass]
	BN2	0.0255	[kg N/kg biomass]
	BN3	0.0148	[kg N/kg biomass]
	BP1	0.0053	[kg P/kg biomass]
BP2	0.0020	[kg P/kg biomass]	
BP3	0.0012	[kg P/kg biomass]	
WSYF	0.200	[(kg/ha)/(kg/ha)]	
USLE_C	0.030		
GSI	0.006	[m/s]	
VPDFR	4.000	[kPa]	
FRGMAX	0.750	[fraction]	
WAVP	6.000	[rate]	
CO2HI	660.000	[µl/l]	
BIOEHI	39.000	[ratio]	
RSDCO_PL	0.050	[fraction]	
CN-DVN			

Figure 23: Table SWAT concernant les types de cultures.

c) Distribution des HRU

Une fois que les couches de sol et d'occupation des sols ont été importées, la distribution des HRU sur le bassin doit être déterminé. La commande de distribution des HRU (figure 20) de SWAT permet à l'utilisateur de spécifier certains critères pour la distribution. Une ou plusieurs combinaisons sol/culture peuvent être créées sur le bassin. L'utilisateur peut assigner une seule HRU à chaque sous bassin selon la classe de sol et de culture dominante ou assigner plusieurs HRU. C'est cette méthode qui a été choisie, elle s'opère en deux étapes. Il s'agit d'abord de déterminer un seuil critique (correspondant au pourcentage de superficie sur le bassin) au dessous duquel les types de cultures ne seront plus pris en compte. Ainsi une parcelle de soja occupant moins de 2 % de la superficie du bassin sera éliminée si l'on place le seuil sur 2.

L'étape est à répéter une seconde fois pour la couche de sol avec le même système de seuil.

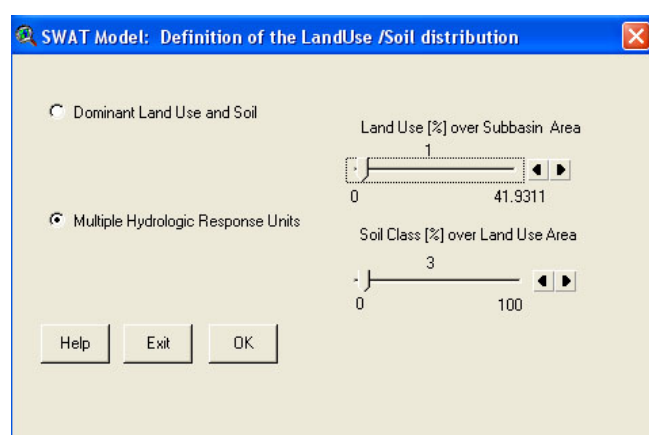


Figure 24: Interface permettant de déterminer la distribution des HRU

La distribution des HRU a abouti à la création de 44 unités combinant sol et cultures. Des seuils faibles (en comparaison de ce qui est préconisé dans le manuel d'utilisation) ont été donnés pour permettre au maximum de types de rotation d'être exprimé sur le bassin. Comme on peut le voir sur la figure, le seuil établi pour la superficie minimale sur le bassin est de 1% et la classe de sol sur le type de culture est de 3 %.

La création de ces unités entraîne la création d'une vue nommée SWAT View, dernière interface avant le lancement du modèle. C'est à partir de cette vue que vont être rentrées les dernières données nécessaires : données climatiques et pratiques agricoles.

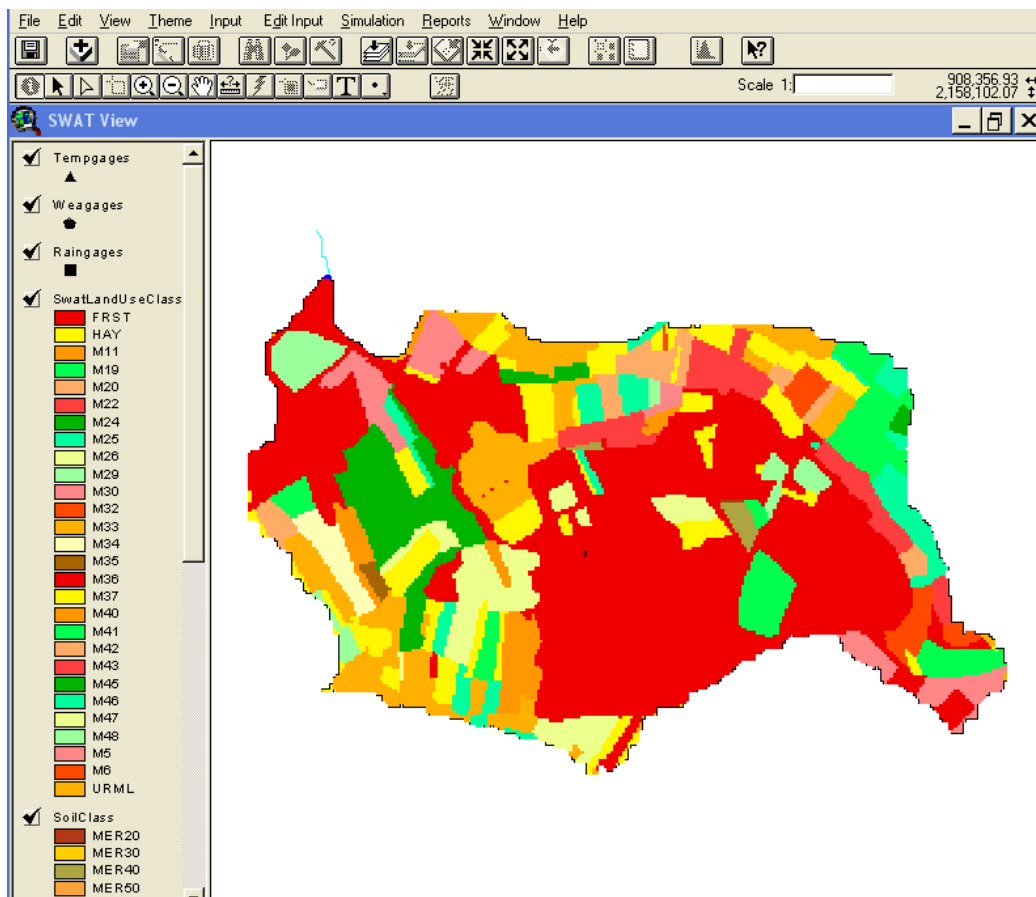


Figure 25: Vue SWAT crée après distribution des HRU

d) Intégration des données climatiques

Les données climatiques qui seront utilisées pour la simulation sur le bassin sont importées une fois que les HRU ont été distribuées. Une fenêtre spéciale permet l'intégration de l'ensemble des données climatiques. Cette interface permet à l'utilisateur de charger la localisation des stations météo les plus proches et les plus significatives pour l'étude du bassin. Dans un second temps les données journalières des différents paramètres climatiques pourront être indiqués. Dans le cas où certains paramètres viendraient à faire défaut, SWAT effectue une simulation de ceux-ci à partir des données mensuelles de références de la station. Les deux figures ci-après présentent l'interface permettant d'intégrer les données et la table des stations météo.

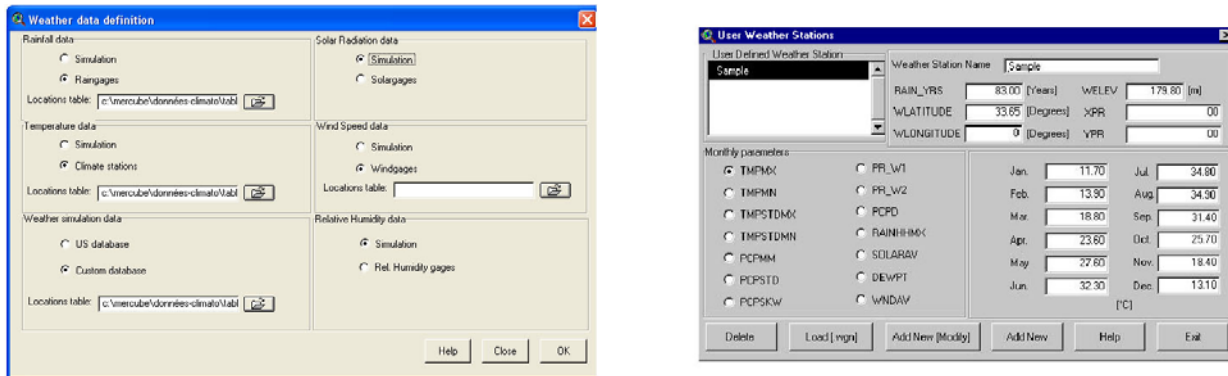


Figure 26: Interface d'intégration des données climatiques et table SWAT des stations météo

Les données journalières doivent être structurées au préalable avant d'être intégrées dans le modèle. Chaque type de paramètres a sa structure propre afin que le tout soit compatible avec le modèle. Un remodelage des données fournies par la station météo a donc été nécessaire. Cette transformation s'est effectuée avec le logiciel Excel. La table des précipitations localisant un ou plusieurs pluviomètres (pcpfork.dbf) doit être structurée de la façon indiquée sur la figure ci-dessous, puis un fichier contenant les valeurs journalières doit être créé et doit porter le nom inscrit dans le champ NAME de la table de localisation du pluviomètre afin que celui-ci soit reconnu et associé au pluviomètre correspondant. Cette dernière table n'apparaît jamais et il n'y a donc pas besoin d'indiquer sa direction, le modèle va automatiquement chercher les données dans le fichier du projet où on aura pris soin de placer la table. Ces deux tables peuvent être créées en format .dbf ou en format texte délimité (ASCII)

Le principe est identique pour les autres paramètres (température, vitesse du vent, ensoleillement...) seule la structure des tables diffère légèrement.

Field name	Field format	Definition
ID	integer	Gage identification number (not used by interface)
NAME	string max 8 chars	Corresponding table ⁺ name string
XPR	floating point	X coordinate in the defined projection
YPR	floating point	Y coordinate in the defined projection
ELEVATION	integer	Elevation of rain gage (m)

Tableau 2: Structuration de la table de localisation des pluviomètre (source : Di Luzio et al. 2002)

Field name	Field format	Definition
DATE	date (yyyymmdd)	Day of precipitation
PCP	floating point (f5.1)	Amount of precipitation (mm)

Tableau 3: Structure de la table des précipitations (source: Di Luzio et al. 2002)

e) Intégration des pratiques agricoles

Une fois les données climatiques rentrées, le modèle va procéder à la construction des différentes tables contenant les informations nécessaires à la création des données d'entrée par défaut utilisées par SWAT (dont celle des pratiques agricoles).

En cas de modification de la distribution des HRU, la commande d'élaboration des tables doit à nouveau être lancée. Parmi les tables créées lors de cette opération, la table « .mgt » concernant les pratiques agricoles va pouvoir être modifiée et les informations obtenues auprès du conseiller agricole vont pouvoir être intégrées. L'interface permettant d'accéder aux différentes tables et de les modifier se présente ainsi :

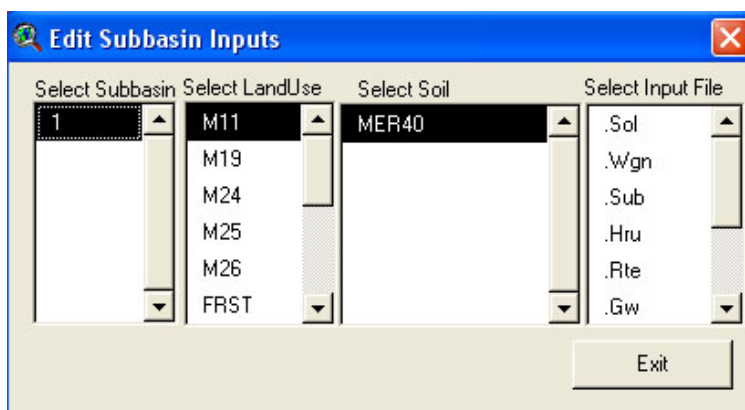


Figure 27: Interface permettant la modification des tables d'entrée

Cette fenêtre se décompose en quatre colonnes. Elles permettent de sélectionner la table que l'on veut modifier (colonne de droite) et ensuite de choisir sur quelle portion de l'espace cette modification doit être appliquée (numéro du sous bassin, type d'occupation et type de sol). Les données concernant les pratiques agricoles doivent donc être intégrées. La table « .mgt » gère les informations relatives à ces pratiques par du découpage cultural des différentes années à modéliser. C'est à dire que l'on peut détailler l'avancement des cultures, déterminer à quelle date sont semées les graines, à quelles dates les fertilisants sont appliqués, en quelle quantité, quels sont les travaux du sol effectués, quand se déroule la récolte et quand commence la semence de la nouvelle culture pour l'année n+1. Ce fichier fonctionne donc en relation avec trois autres fichiers intégrés dans les bases de données SWAT, une table concernant les cultures dont il a été question dans la partie intégration des données concernant l'occupation du sol, et son équivalent pour les données concernant les travaux du sol (Till.dbf) et les types de fertilisants (fert.dbf) dont certains ont du être ajoutés aux fertilisants américains pré-intégrés dans SWAT.

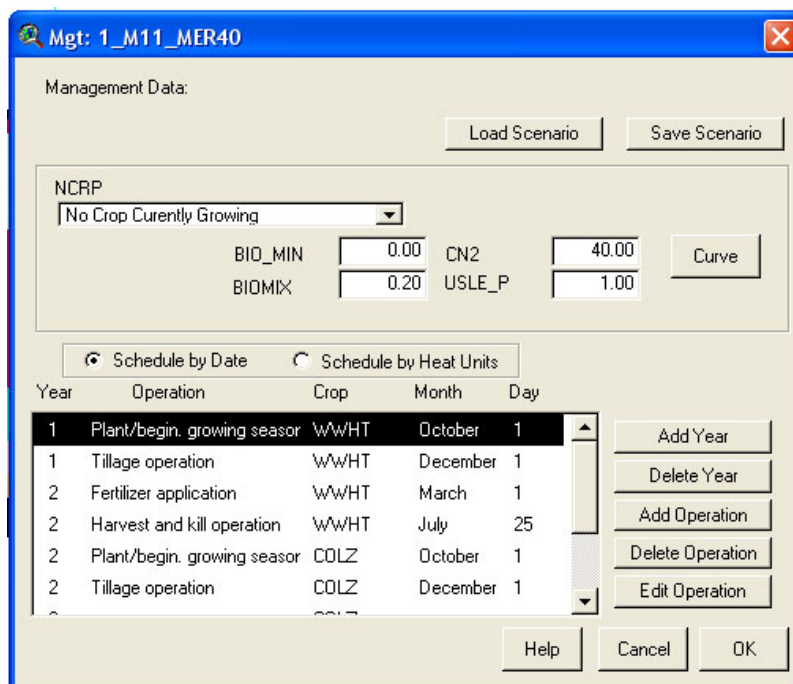


Figure 28: Interface permettant le découpage des années culturales par les différentes pratiques agricoles

Comme pour les autres procédures d'intégration de données (sol, occupation...), il est possible pour les pratiques agricoles d'importer directement des tables que l'on aura pris soin de structurer comme l'indique le manuel d'utilisation. Cependant, notre bassin étant de petite taille, et étant donné le nombre relativement restreint de parcelles et de HRU, il est plus rapide d'intégrer les données directement dans les tables préétablies et ne pas s'embarrasser avec de nombreux formulaires Access. Cependant pour les bassins de plus grande taille, les méthodes d'importation de formulaires structurés présentent de nombreux avantages.

3) Simulation

a) Options de simulations

L'essentiel des données est maintenant intégré au modèle et celui-ci est donc prêt pour la simulation. Plusieurs options s'offrent alors à l'utilisateur. Le choix concernant ces options se fait par le biais de la boîte de dialogue ci-après. La première chose à définir est la période de temps sur laquelle la simulation va être effectuée. L'INRA dispose de mesures de débit du cours d'eau et d'analyses chimiques depuis 1997. La période de simulation sera donc de 1997 à 2003. Nous lancerons cependant la simulation à partir de 1991 date à partir de laquelle nous avons des données météo, afin que le modèle soit bien en place pour démarrer 1997.

La deuxième section concerne la méthode de calcul des précipitations et du ruissellement. Les méthodes choisies dépendent du type de données disponibles.

La troisième section prend en charge la création de données de précipitations. Etant donné que nous disposons déjà de cette information, cette option ne nous est pas utile.

La section suivante propose à l'utilisateur différentes équations permettant de calculer l'évapotranspiration. Ces équations sont plus ou moins compliquées et ne demandent pas le même nombre de données. Après essai des trois méthodes, nous avons choisi la méthode de Priestley-Taylor, nous disposions des données nécessaires pour la calculer et c'est elle qui présente les meilleurs résultats.

De la même manière, deux méthodes sont disponibles pour calculer le cheminement de l'eau. Ces deux méthodes sont plus ou moins adaptées au contexte local et ce n'est qu'après avoir testé les deux que nous avons décidé de choisir la première (variable storage) qui calcule la différence entre les flux entrant dans le bassin et les flux sortant en fonction du temps écoulé.

Le dernier choix important laissé à l'utilisateur est le pas de temps de sortie. Trois pas de temps sont disponibles : annuel, mensuel et journalier. Dans le cadre de notre projet et afin de saisir les variations saisonnières de débit et de flux de phosphore, nous nous sommes attachés dans un premier temps au pas mensuel. Puis considérant que les différentes mesures (débit, chimie...) sur le bassin étaient hebdomadaires, nous avons également sorti des simulations au pas de temps journalier que nous avons ensuite convertis en mesures hebdomadaires afin de pouvoir comparer de manière correcte simulations et observations. Cette conversion a été effectuée à l'aide du logiciel Excel, une macro a été réalisée afin de répéter plus rapidement l'opération après chaque nouvelle simulation.

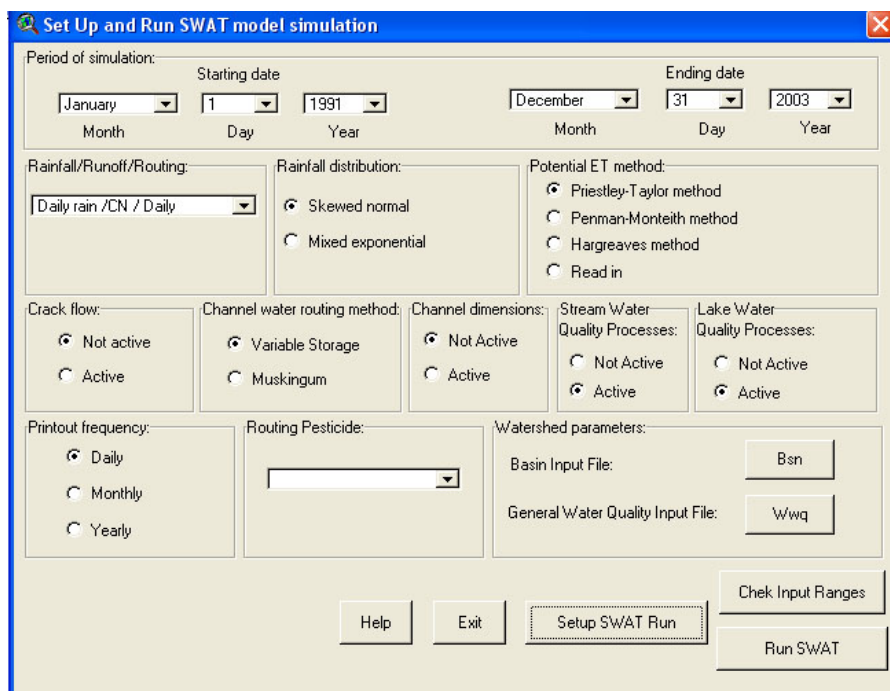


Figure 29: Boîte de dialogue pour le lancement de la simulation

b) Fichiers de sortie

Des fichiers de sorties sont générés à chaque nouvelle simulation de SWAT. Le fichier résumant les processus sur le bassin (output.std) permet de voir à chaque pas de temps, les valeurs du ruissellement, de l'infiltration, de l'évapotranspiration, des pertes de sédiments etc...

Le fichier « .sbs » présente les mêmes paramètres que précédemment mais en les détaillant au niveau des HRU.

Le fichier « .bsb » détaille les valeurs des processus à l'échelle du sous bassin versant.

Enfin, le fichier « .rch » montre les valeurs des paramètres concernant l'eau dans le cours d'eau (débit à l'exutoire, matières en suspension, phosphore total...).

Ces fichiers sortent sous la forme de fichiers texte délimités. A certains niveaux et pour certains paramètres, il est possible de les représenter sous forme graphique en important le fichier sous Excel et en délimitant correctement les colonnes souhaitées. Il est ainsi possible de profiter des capacités d'analyses statistiques du logiciel, bien que pour certains pas de temps, le nombre d'enregistrements affichables est insuffisant.

Les représentations cartographiques sont assez limitées puisqu'il n'a pas été prévu de représenter les différents phénomènes à l'échelle de la HRU alors que pour notre projet, cette échelle serait la plus intéressante

Partie 5 :

Calibration préliminaire du modèle.

1) Méthodologie

Les simulations hydrologiques peuvent désormais être réalisées. Pourtant pour permettre une meilleure concordance entre les variables simulées et observées, il est nécessaire d'adapter certains paramètres du modèle. Cette phase s'appelle la calibration. Elle consiste dans un premier temps à ajuster le bilan hydrique qui contrôle l'ensemble des processus hydrologiques sur le bassin. Cet ajustement ne peut se faire sans une modification des paramètres de sol et d'occupation qui ont une incidence essentielle sur le bilan hydrique.

La première variable à corrélérer concerne les débits à l'exutoire du cours d'eau, au pas de temps mensuel, puis hebdomadaire. Puis dans un second temps, les flux de sédiments et les flux de phosphore devront être calibrés.

Les mesures de débit observées qui seront utilisées pour la calibration proviennent des mesures effectuées par le limnigraphe dont est équipé l'exutoire du bassin versant (voir II.3 hydrographie).

Deux indices permettent d'apprécier la corrélation entre les variables simulées et les variables observées. Il s'agit dans un premier temps du coefficient de corrélation. Cet outil d'analyse permet de mesurer la relation existant entre deux séries de données.

Le second, présenté par les autres ouvrages comme le plus significatif, est le coefficient de Nash. Cet indice offre une évaluation plus précise de l'efficacité quant au respect des volumes écoulés et des écart absolus (Bioteau et al. 2002). Celui-ci est défini par la formule :

$$E_{Nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_{iobs} - y_{sim})}{\sum_{i=1}^N (y_{iobs} - \bar{y}_{obs})}$$

Avec $\bar{y}_{obs}$ = valeur moyenne de la variable observée

y_{obs} = valeur de la variable observée

y_{sim} = valeur de la variable simulée

Le critère de Nash varie de $-\infty$ pour un ajustement très mauvais à 1. Une valeur proche de 1 traduit une forte liaison entre les observations et les simulations. En l'absence de biais entre les observations et les simulations, la valeur est égale à celle du coefficient de détermination de la régression. (Petrescu-Maftei, 2002).

2) Ajustement du bilan hydrique

Deux critères sont pris en compte pour calibrer les flux d'eau. On considère d'abord le niveau de corrélation entre les débits mesurés et les débits observés à l'exutoire, puis on estime la concordance concernant la répartition des volumes d'eaux écoulés entre écoulement de surface et écoulement souterrain. Pour estimer ces contributions respectives sur le bassin, un petit programme a été mis en place (Arnold et al. 1999). Il s'agit du programme *baseflow*. Il faut pour cela créer deux fichiers présentant la pluviométrie journalière et les débits à l'exutoire, puis le programme estime la contribution des écoulements souterrains et de surfaces.

Pour le bassin versant du Mercube, *Baseflow* évalue à 77% la contribution des écoulements souterrains.

On obtient le tableau ci dessous :

Débit à l'exutoire	Ecoulement de surface	Ecoulement souterrain
1	0.23	0.77

Tableau 4 : Estimation "Baseflow" des contribution au débit par les écoulements de surfaces et souterrains

Une fois les contributions respectives estimées, la calibration se déroule en deux étapes. La première étape consiste à ajuster le ruissellement de surface jusqu'à ce qu'il soit en adéquation avec la valeur estimée par le programme *Baseflow*. Cet ajustement se joue au niveau de trois paramètres. Le premier et le plus important est le curve number (CN2 dans la table « .mgt » des pratiques agricoles). Ce paramètre typiquement américain et qui n'a pas d'équivalence dans le contexte français correspond à un coefficient de ruissellement attribué à chaque type d'utilisation du sol en fonction du groupe hydrologique du sol. Légèrement trop élevé, les « curve number » de chaque types de cultures ont du être abaissés.

Il est également possible de jouer sur les valeurs de capacité en eau des sols. La diminution de ce paramètre entraîne logiquement une augmentation du ruissellement de surface. Les valeurs réelles de capacité en eau proviennent d'analyses réalisées par Jordan-Meille en 1998. Une valeur minimale et maximale est donnée à chaque type de sol, l'ajustement a donc consisté à faire varier les valeurs entre les valeurs extrêmes.

Un autre facteur peut également être modifié, il s'agit d'un coefficient de compensation (ESCO) qui modifie la quantité d'eau qui peut être évapotranspirée.

Lorsque le ruissellement est acceptable, la contribution de l'écoulement souterrain doit alors être ajustée. La table « .gw » contient tous les paramètres concernant la circulation de l'eau dans l'aquifère. Afin d'obtenir une bonne corrélation entre les débits, la plupart des paramètres doivent être retouchés.

Le paramètre GWQMN (seuil de profondeur d'eau requis pour recharger la nappe) déclenche la recharge effective de la nappe lorsque ce seuil d'eau est accumulé dans l'aquifère.

Le coefficient de recharge de la nappe (GW_revap) joue également un rôle important, il détermine la qualité de l'eau à se déplacer vers l'aquifère ou à rester dans la zone racinaire et être disponible pour la plante. Ainsi plus le coefficient sera fort, plus l'eau pourra se déplacer de l'aquifère peu profond vers une zone plus superficielle ou elle sera utilisable par la plante. Ces volumes ne se retrouveront donc pas à l'exutoire.

Le dernier paramètre de grande importance est le *Baseflow alpha factor*. Cet indice correspond à un facteur de rapidité de recharge du cours d'eau par l'aquifère profond, il permet d'ajuster les temps de réponses du bassin, de limiter les décalages temporels et contrôler les récessions pendant les décrues.

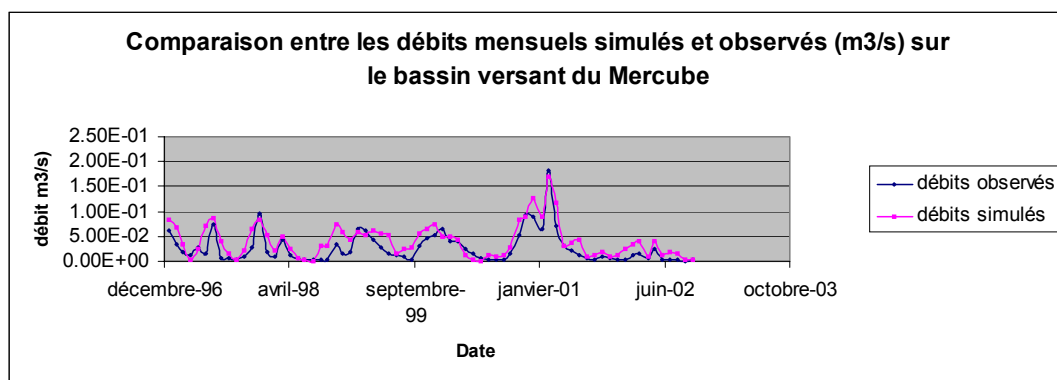
3) Résultats

Plusieurs simulations ont été réalisées et plusieurs essais de calibration ont été effectués. Cette procédure est un travail de longue haleine et demande beaucoup de patience. Beaucoup de paramètres (seuils, délais) contrôlent l'écoulement de l'eau, et plusieurs combinaisons de facteurs doivent être essayées.

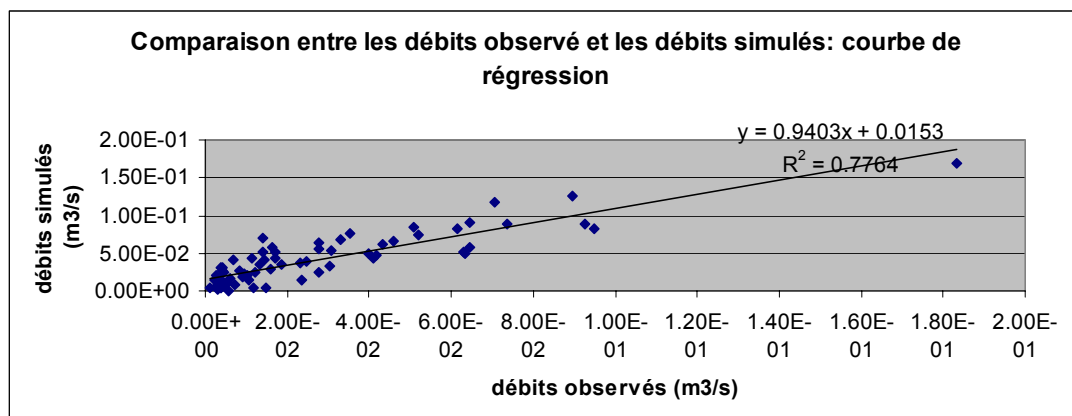
La première simulation a été effectuée au pas de temps mensuel afin de simuler les grandes tendances saisonnières des processus en jeu. Ensuite une tentative de calibration au pas de temps hebdomadaire a été mise en place. Les graphiques ci-après présentent les premiers résultats obtenus.

coefficient de corrélation total	année 97	année 98	année 99	année 2000	année 2001	année 2002
0.881147	0.78	0.78	0.75	0.90	0.95	0.98
différence des moyennes						
0.013681806						
différence des écarts-types						
0.002086273						

Tableau 5: Coefficients de corrélation de la simulation au pas temps mensuel des années modélisées



Graphique 1 : Comparaison entre les débits simulés et observé au pas de temps mensuel



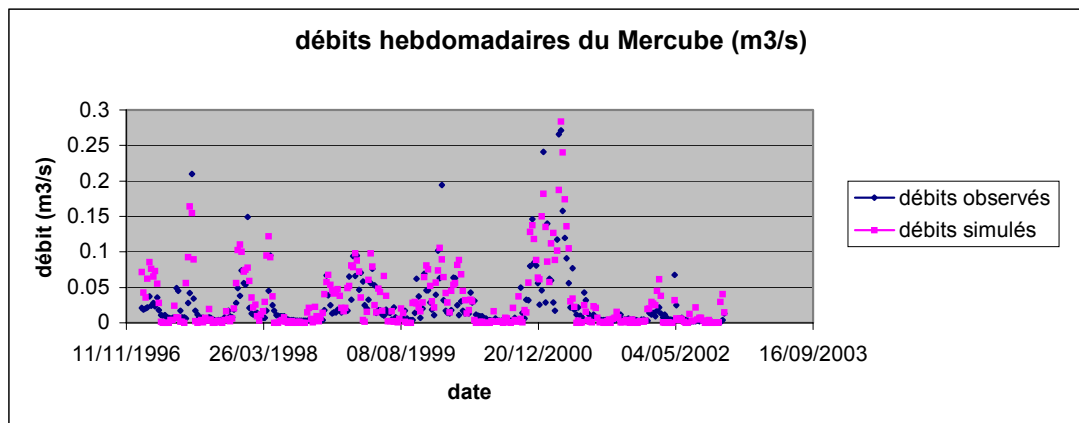
Graphique 2: Comparaison entre les débits simulés et observés au pas de temps mensuel (régression linéaire)

Les résultats au pas de temps mensuels apparaissent satisfaisants, la simulation des débits est fidèle à la réalité. Les coefficients permettant de juger de la qualité de la corrélation sont bons, le coefficient de corrélation sur l'ensemble des années modélisées s'élève à 0.88 et le coefficient de Nash à 0.77. Cependant un pas de temps plus précis est nécessaire.

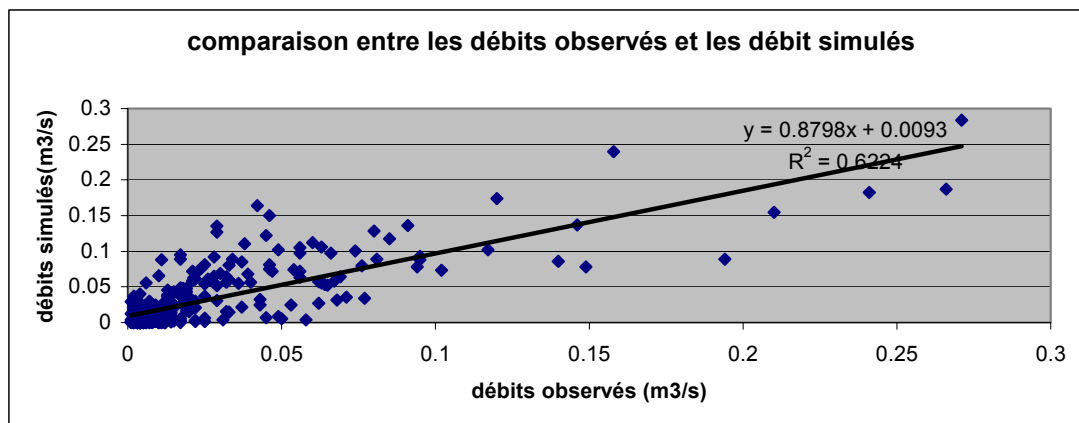
Les graphiques suivants présentent les résultats de la simulation des débits obtenus après simulation et calibration au pas de temps hebdomadaire.

coefficient de corrélation	année 1998	année 1999	année 2000	année 2001
0.81	0.71	0.68	0.74	0.86
différence des écart types				
0.00827519				
différence des débits moyens				
0.006348785				

Tableau 6 : Coefficient de corrélation des débits au pas de temps hebdomadaire



Graphique 3 : Comparaison entre débits simulés et observés au pas de temps hebdomadaires



Graphique 4: Comparaison entre débits observés et simulés au pas de temps hebdomadaire (régression linéaire)

Le coefficient de corrélation et l'indice de Nash mesurent les relations existantes entre les deux séries de données. Après l'ajustement des paramètres du modèle, la simulation donne un coefficient de corrélation sur les quatre années modélisées de 0.80 (le maximum étant de 1), l'année la mieux simulée étant 2001 (0.86). La différence des écarts-types présente une valeur de 0.007 et la différence des moyennes affiche 0.005 m³/s. le coefficient de la droite de régression correspond à l'indice de Nash. Au delà de 0.60, on considère que le modèle reproduit correctement les débits sur le bassin. On voit que cet indice atteint 0.62, gage de la qualité de la corrélation des débits simulés.

Pourtant malgré cette apparente bonne corrélation, le fichier de sortie faisant part de l'importance des différents processus au niveau annuel sur le bassin montre une contribution trop forte des écoulements souterrains au détriment du ruissellement de surface (la proportion des écoulements souterrains s'élève à 90 % alors que le programme *Baseflow* les estime à 77 %). Ceci peut avoir pour conséquence de biaiser la simulation des transports de sédiments et des transferts de phosphore, ceux-ci étant généralement liés à l'érosion et au ruissellement.

Il est donc nécessaire de continuer les efforts de calibration et tester d'autres combinaisons de facteurs (Voir tableau 7). Il apparaît judicieux d'orienter les recherches vers l'ajustement des « curve number » (coefficient de ruissellement) qui nécessitent certainement une augmentation afin de ramener le ruissellement à un niveau convenable et dans une proportion en accord avec les estimations du programme *baseflow*. Une fois que les valeurs de ruissellement seront acceptables, il faudra de nouveau tester différentes combinaisons des paramètres de la nappe. Il est possible d'améliorer également le comportement du bassin pendant les périodes hivernales pour tenter de prendre en compte les effets de fonte de neige et les retards induits sur l'hydrogramme.

Ce n'est qu'à partir de là que nous pourrons entamer une calibration des sédiments et des transports de phosphore. Cependant les premiers résultats obtenus restent encourageant et laissent présager de bons résultats dans les mois qui viennent. SWAT apparaît donc comme un outil intéressant pour modéliser les mécanismes et les processus mis en œuvre sur un bassin versant et ainsi proposer des scénarios environnementaux afin de réduire les flux de phosphore qui atteindront le lac Léman.

Partie 6 :

Discussion et conclusion

Une grande diversité de modèle

Les modèles hydrologiques sont très nombreux et leurs domaines d'applications aussi. Lors d'un projet de mise en place d'un modèle, il est essentiel de bien réfléchir aux enjeux et aux objectifs du projet. Le choix doit être orienté en fonction de plusieurs critères. Quels processus doivent être simulés ? Quelle quantité et quels types de données sont nécessaires au fonctionnement du modèle ? Vais-je pouvoir disposer de ces données rapidement et sans dépenser trop d'argent ?

Il est important de se renseigner au préalable sur les caractéristiques et les résultats fournis par les différents modèles. Il peut être intéressant de regarder sur quels types de bassin ils ont déjà été utilisés et quelles qualités de résultats ils ont donné. On peut ensuite comparer les caractéristiques de ces bassins avec celui où l'on souhaite effectuer les simulations.

D'après mes recherches bibliographiques, SWAT n'avait jamais été utilisé sur un bassin versant aussi petit que le bassin versant du Mercube (la taille totale de mon bassin correspond à la taille du plus petit sous bassin modélisé dans les projets que j'ai pu lire!). La figure ci-dessous présente un aperçu des différents modèles hydrologiques existants. En abscisse, la surface des bassins et en ordonnée les pas de temps disponibles sont indiqués. L'ellipse rouge symbolise la place du bassin versant du Mercube.

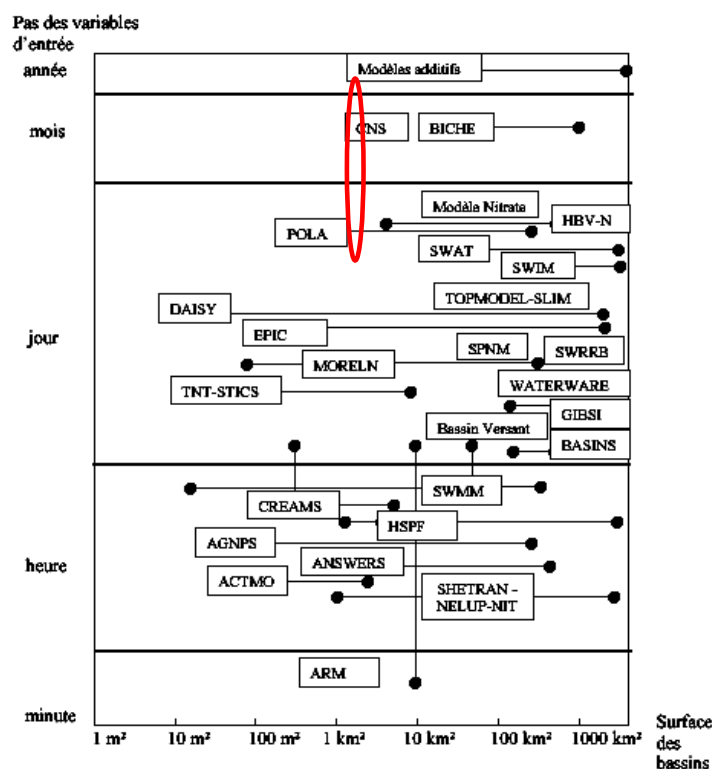


Figure 30 : Aperçu des différents modèles hydrologiques (source: Payraudeau 2002)

On remarque qu'au niveau des pas de temps, les solutions proposées par SWAT sont conformes aux attentes du projet du Mercube. Les fréquences journalières et mensuelles sont celles désirées. Par contre on voit qu'au niveau de la superficie des bassins, le Mercube se situe largement en dessous des surfaces couvertes par le modèle. En effet notre bassin occupe 3 km² alors que SWAT a été conçu pour des bassins allant de la dizaine de km² à plusieurs milliers de km².

Les processus basés sur des équations déterministes risquent d'être peu influencé par la taille du bassin, alors que ceux basés sur des modèles empiriques (issus d'expériences faites dans des conditions bien précises) pourraient être mal modélisés sur des bassins de petite taille.

Par ailleurs, certains paramètres comme par exemple les types de connexions entre la parcelle et le réseau hydrographique qui ont une importance capitale sur les processus hydrologiques et sur le comportement général du bassin du Mercube peuvent être mal pris en compte. En effet, sur des bassins de plus grande taille, de tels phénomènes ne sont pas essentiels, et sont donc « noyés » par d'autres phénomènes de plus grande ampleur.

C'est l'hétérogénéité du bassin versant du Mercube qui peut expliquer les spécificités de son fonctionnement, alors qu'un modèle comme SWAT aurait plus tendance à lisser ces petites particularités.

Cependant même si SWAT n'apparaît pas entièrement adapté au bassin versant du Mercube, les résultats fournis par le modèle ne sont pas complètement déconnectés de la réalité, et l'on peut donc réfléchir aux améliorations que l'on peut apporter.

Vers une amélioration de la précision du modèle :

La qualité de la simulation avec un tel modèle est intimement liée à la précision et la fiabilité des données qui vont y être intégrées. Les différentes mesures conduisant à une amélioration de la qualité de ces données apporteraient une meilleure fidélité aux simulations.

- La précision des données climatiques peut être améliorée. En effet il serait intéressant d'obtenir les données climatiques de la station de Sciez située à seulement quelques kilomètres du bassin. La pluviométrie sur le bassin pourrait ainsi être précisée, afin d'éviter entre autres les effets d'orages d'été locaux. En effet nous nous sommes aperçus que la conséquence sur les débits de certains événements pluvieux localisés apparaissait sur les données simulées alors que les mesures observées sur l'hydrogramme ne présentent aucun pic de crue. Les données de Sciez seraient plus en adéquation avec les événements du bassin.

- Le bassin versant du Mercube est une zone relativement plate. La création du modèle numérique est donc entachée d'incertitudes dans ces zones. Afin d'améliorer la précision du modèle numérique il pourrait être intéressant de mettre en place une campagne GPS. On pourrait imaginer un système avec un GPS différentiel équipé sur un VTT qui pourrait parcourir le bassin en effectuant des transects afin d'obtenir un maillage plus serré de points d'altitude. L'extraction du réseau hydrographique serait de ce fait améliorée.

- L'extraction d'un réseau à partir d'un MNT est un vaste sujet de recherche qui a donné lieu à différentes techniques, car bien souvent l'extraction est partiellement faussée. La procédure mise en place étant automatisée, l'extraction est utilisée malgré ses limites. Les méthodes consistant à modifier le MNT sont là pour améliorer cette extraction. C'est le cas dans SWAT avec le « *burning* ». Mes recherches bibliographiques se sont orientées vers d'autres méthodes de modification du MNT qui pourraient s'avérer plus efficaces.

Une technique présentée par Payraudeau en 2002 montre de meilleurs résultats que la technique du « *burning* ». En effet au lieu de brûler les cellules occupées par le réseau, cette technique propose d'augmenter la valeur d'altitude des cellules qui n'y appartiennent pas.

- Il pourrait également être intéressant de se procurer des images satellites du bassin versant afin de pouvoir effectuer des procédures de classification dirigée par télédétection pour obtenir une occupation du sol plus précise, notamment en ce qui concerne la localisation des routes, chemins et zones urbaines. De plus les types de cultures étant assez peu varié sur le bassin, une campagne de télédétection pourrait aisément aboutir à des résultats satisfaisants.

- La mise en place d'un suivi hydrogéologique à l'aide de piézomètres permettrait de connaître un peu mieux le fonctionnement des nappes sur le bassin afin d'estimer la contribution réelle des écoulements souterrains. L'ajustement des paramètres de la nappe serait alors plus efficace et moins intuitif.

Intérêt et limites du modèle SWAT.

Les premiers résultats obtenus laissent présager de la bonne efficacité du modèle SWAT pour simuler les phénomènes hydriques et les processus de transferts de polluant. Bien que l'intégration des données soit assez longue, l'interface développée est assez conviviale et avec une bonne utilisation du manuel, la prise en main est assez aisée.

L'utilisation conjointe du modèle avec le SIG permet de prendre en compte la variabilité spatiale au sein de la modélisation. Cela permet également de renseigner facilement les caractéristiques des variables.

Quelques critiques peuvent cependant être apportées. La première provient de la susceptibilité du modèle en effet même si certains bogues sont dus à des erreurs de manipulation, de nombreux autres restent inexpliqués et provoquent la perte des données enregistrées et parfois du projet complet. Après plusieurs jours d'intégration, il est très agaçant de devoir recommencer les procédures du début. !!!

A l'origine développée pour des grands systèmes culturels américains, SWAT semble tout de même pouvoir s'adapter aux conditions françaises. Il est pourtant parfois difficile de s'y retrouver parmi la masse de paramètres, d'autant plus quand ceux-ci sont typiquement américains et ne correspondent à aucun de nos paramètres français, l'ajustement de ces dits paramètres est donc pratiqué par une méthode fastidieuse et peu orthodoxe qui est la dichotomie ou plus vulgairement le tâtonnement.

On regrettera le fait qu'il n'est difficile et dans certains cas impossible de travailler au niveau de la HRU. En ce qui concerne la mise en graphique des phénomènes hydrologiques à l'échelle de la HRU est très restreinte. En effet pour 44 HRU (ce qui au vu des autres projets SWAT) et sur une période de temps de 5 ans, le modèle sort un total 80 000 valeurs environ. Or Excel qui est le logiciel le plus commun pour traiter ce genre de tâche n'admet que 65 000 valeurs et il est donc impossible de représenter graphiquement les différents phénomènes.

Quant à la visualisation cartographique, celle-ci n'est pas prévue par le logiciel. Une méthode consisterait à effectuer manuellement des intersections entre couches de sol et d'occupation afin d'obtenir les HRU, puis d'affecter des champs communs entre les tables de données et les couches intersectées. La dernière étape consisterait à effectuer des jointures entre les tables de sorties de SWAT et les couches intersectées sur la base du champ commun. Cependant notons que la couche des HRU obtenue par intersection et la véritable distribution des HRU dans le modèle ne sont pas cohérentes puisque par l'intersection toutes les HRU sont représentées alors que le modèle a procédé à des agrégations et a supprimé les HRU dont la surface n'atteignait pas un certain pourcentage du bassin. Les visualisations, par exemple, du ruissellement au niveau des HRU que l'on pourrait effectuer ne seraient donc pas représentatives ni conformes à ce que montre le modèle.

On peut enfin réfléchir sur la pertinence et la fiabilité des données intégrées aux modèles. Ces données, très nombreuses possèdent toutes une marge d'erreur. La combinaison de ces paramètres par le modèle peut aboutir à une accumulation de petites erreurs. Le modèle pourrait ainsi apparaître comme une représentation simplifiée mais fidèle de la réalité alors que les paramètres des variables pourraient apparaître pour certains irréels ou surréalistes.

Conclusion

Les premières étapes du projet qui consistaient à mettre en place les premières couches de données nécessaires au fonctionnement de SWAT ont été réalisées avec succès. La campagne de sol a permis le renseignement des données pédologiques. Les autres données recueillies auprès des différents intervenants ont été intégrées au modèle, permettant ainsi son bon fonctionnement. Le bassin versant a ainsi été découpé en plus de 40 HRU, chacune possédant une combinaison sol/occupation propre. Chacune d'entre elles possède également un scénario de pratiques agricoles spécifiques.

Une calibration et un ajustement préliminaire du bilan hydrique ont été réalisés, celui-ci, loin d'être parfait va demander quelques efforts supplémentaires de calibration et un temps de travail plus conséquent. De nombreuses combinaisons de valeurs des variables de sol et d'écoulements souterrains doivent encore être testées afin d'approcher au plus près les comportements observés. Les estimations de débit et de ruissellement apparaissent tout de même réalistes et ces premiers résultats sont encourageants. Ils montrent que bien que SWAT ne soit pas totalement fait pour un bassin versant comme le Mercube, le modèle prend bien en compte les principaux facteurs déterminant les risques de transfert du phosphore et les simulations apparaissent réalistes. Ceci témoigne de la potentialité du modèle à prédire le comportement du bassin (débit à l'exutoire, charge de sédiments et transferts de phosphore) en fonction des conditions agro-climatiques fournies.

Une fois les étapes de calibration et de validation terminées, des scénarios d'interventions agro-environnementales pourront être mis en place et la fonction d'outil de gestion du modèle SWAT apparaîtra comme complète. L'un d'entre eux en particulier complèterait un ensemble de recherches menées par plusieurs chercheurs de l'INRA concernant les bandes herbeuses. Le premier scénario à mettre en œuvre consisterait à installer une bande de 20 mètres de chaque côté de l'ensemble du réseau hydrographique. Les simulations permettraient de bien saisir les effets des bandes herbeuses sur les quantités de phosphore retrouvées dans la rivière. D'autres scénarios pourraient être mis en œuvre avec les acteurs et partenaires locaux, à partir de politiques locales, afin de connaître les impacts induits par ces politiques. Le modèle pourrait donc alors servir comme support pour l'évaluation d'actions potentiellement applicables au territoire.

Des précautions seraient pourtant à prendre dans l'hypothèse qu'un tel modèle devienne une référence pour imposer un ensemble de normes applicables à un espace plus grand que celui du bassin. En effet soulignons encore le fait qu'il existe une manne assez conséquente de modèles hydrologiques et que ceux-ci sont adaptés à des types de bassin versant. Il pourrait donc être risqué de ne se baser que sur un type de modèle pour mettre en œuvre des actions à une échelle plus grande.

Bibliographie

ACTA (association de coordination technique agricole), (1998) : *Index phytosanitaire*

AMONETT, C. (2002) : *Watershed modelling using Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*. USDA-NRCS. 30 pp

Supprimé :) :

BARROIN, G. (1991): *La pollution par les phosphates*. ADEMART. n° I.S.B.N. 2-909256-12-X. 15pp

BIOTEAU, T, et al. (2003) : *Evaluation des risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole à l'échelle de bassins versants : intérêts d'une approche par modélisation avec SWAT*. Document CEMAGREF. 10 pp.....

BUGNET, G. (2000) : *Cartographie et répartition de l'occupation du sol dans le bassin versant du Mercube en 2000*. Rapport INRA. 28 pp

CAM, C. (1977) : *Etudes pédologiques des formations quaternaires de la baie de Sciez (rive Lémanique –Chablais). Cartographie-Evolution-Hydrodynamique*. Mémoire de DEA Université Paris VII. ORSTOM. 20 pp

CHARLEUX-DEMARGNE, J. (2001) : *Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'hydrologie. Application à la caractérisation du régime de crue des bassins versants*. Thèse ENSG. Université de Marne la Vallée. Pp 10-77.

CROS, X. (1994): *Influence du développement des activités humaines sur les risques de transfert de pollution phosphatée diffuse au lac Léman. Etude sur 20 communes du Genevois Haut-savoyard*. Mémoire de DESS. Université de Poitiers. 30pp

De MOOY, J. (1998): *Contribution d'un Système d'informations Géographiques à l'analyse des risques de polluants dans un bassin versant Lémanique*. Rapport de stage. Université Agronomique de Wageningen Pays-Bas. INRA Thonon. 40pp

Mis en forme : Anglais
Royaume-Uni

DI LUZIO, M., SRINIVASAN, R., ARNOLD, J.G., NEITSCH S.L. (2002) : *Arcview Interface For SWAT 2000 User's Guide*. Grassland Soil and Water Research Laboratory. Agricultural Research Service. 351pp

DORIOZ, J.M et al. (2004) : *Effets de la gestion de bassins versants sur les transferts particuliers et dissous et la qualité biologique des eaux de surface en zone d'élevage*. Action structurante INRA-CEMAGREF « Acquae »

Mis en forme : Anglais
Royaume-Uni

- DORIOZ, J.M et VANSTEELANT, A. (2002): *Les dispositifs enherbés: outils de gestion de la pollution diffuse phosphorée d'origine agricole?* . Rapport pour le groupe "phosphore" du CORPEN. 60pp
- DUGUET, F., MICHAUD, A.R, DESLANDES, J., RIVEST, R. et LAUZIER, R.(2002) : *Gestion du ruissellement et de l'érosion pour limiter les pertes en phosphore en bassin versant agricole*. AGROSOL. 9pp
- DUPONT, S. (1994): *Typologie et cartographie des sols du Bas-Chablais en vue de l'élaboration d'une échelle de risque de ruissellement des terres agricoles*. Mémoire de stage. INRA-GIS Alpes du Nord. 31pp
- DUROS, V. (2001) : *Adaptation d'un modèle agri-environnemental au contexte de deux bassins versants Bretons*. Mémoire de DESS. Université Jean Monnet de St-Etienne. Cemagref Rennes 57 pp
- BOUCHARDY, J.Y (1992) :*Méthodologie pour la spatialisation des zones sensibles à la pollution diffuse agricole par le phosphore à l'aide de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques (SIG)*. Thèse. Université Grenoble 1. 275 pp
- CHARLEUX-DEMARGNE, J (2001) : *qualité des Modèles numériques de terrain pour l'hydrologie. application à la caractérisation du régime des crues des bassins versants*. Université de Marne-la-vallée.275 pp
- FITZHUGH T.W, MACKAY D.S (2000) : *Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model*. Journal of hydrology 236. 35-53
- JOLIVEAU, T. (2004) : *Systèmes d'information Géographiques, des concepts aux applications*. Support de cours. Université Jean Monnet de St-Etienne.
- JORDAN-MEILLE, L. (1994) : *Etudes sur les origines et les transferts de nutriments dans un bassin versant rural du bassin lémanique. Cas particulier du phosphore*. Travail de diplôme, EPFL-INRA, Thonon. 74 pp
- JORDAN-MEILLE, L. (1998) : *Modes de transfert du phosphore d'origine diffuse dans un petit bassin versant rural lémanique*. Thèse n°1775 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 320pp
- KASTIRAN INDARTO (2002) :*Découpages spatiaux et conséquences sur le bilan hydrologique - Application au bassin de l'Orb à travers une démarche de modélisation hydrologique distribuée*. Thèse ENGREF Montpellier. 203pp
- LE CLERC, S. (2004) : *revisiter la notion de scénarios hydrologiques de référence pour la caractérisation des inondations*. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier. Grenoble.373 pp

LEMONDS P et MCCRAY J E (2003) : *Modeling Phosphorus Transport in the BlueRiver Watershed, Summit County, Colorado*. First interagency conference on research on the watershed. 10 pp

LEVESQUE, G. (2003): *mise en œuvre du modèle SWAT sur le bassin versant de la rivière aux Brochets*. Mémoire de DESS. Université Jean Monnet de St-Etienne. 61pp

LOZET, J. et MATHIEU C. (1986) : *dictionnaire de science du sol*. Lavoisier TEC et DOC. 383 pp

Mis en forme : Anglais
Royaume-Uni

NEITSCH, S.L, ARNOLD, J.G, KINIRY, J.R, WILLIAMS, J.R, KING, K.W (2002) : *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2000*. Grassland Soil and Water Research Laboratory. Agricultural Research Service. 506 pp

NEITSCH, S.L, ARNOLD, J.G, KINIRY, J.R, SRINIVASAN, R., WILLIAMS J.R (2002) : *Soil and Water Assessment User's Manual Version 2000*. Grassland Soil and Water Research Laboratory. Agricultural Research Service. 472 pp

PARMELAND, E. (1995): *Zones tampon et pollution diffuse dans le bassin versant du Léman*. Mémoire de DEA. Université Joseph Fourier Grenoble. 57pp

PAYRAUDEAU, S. (2002) : *Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens*. Thèse ENGREF. 277 pp

PETRESCU-MAFTEI, C (2002) : *ETUDES CONCERNANT LES ECOULEMENTS SUPERFICIELS. Modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de Voinești – Roumanie*. Thèse Université de Montpellier.

PILLEBOUE, E. (1987) : *Origines, bilans et mécanismes de transfert de Pet N d'un BV vers un lac*. Thèse, Université Paris 6. 69 pp

PRIEUR DREVON, D. (2002): *D'un site pilote à une démarche globale sur le Bas-Chablais: mise en place d'une méthode de lutte contre la pollution diffuse du phosphore d'origine agricole*. Mémoire de DESS. Université de Savoie. 56pp

ZHOU, Y et FULCHER C. (1999) : *A watershed management tool using SWAT and ARCINFO*. 12 pp

Table des figures

Figure 1: origine des flux de phosphore (source: CIPEL 2002)	10
Figure 2: Evolution du taux de phosphore dans le lac Léman (source: CIPEL)	12
Figure 3: Localisation du bassin versant du Mercube	15
Figure 4: Vue 3D du bassin versant du Mercube (réalisation : RENAUD, 2004)	16
Figure 5: Fonctionnement pédogénétique du bassin versant du Mercube (réalisation : Renaud, 2004)	18
Figure 6: Etapes conditionnant la distribution et la pédogénèse des sols (réalisation : Renaud, 2004)	19
Figure 7: Carte des sols du bassin versant du Mercube (réalisation : Renaud, 2004)	20
Figure 8 : Réseau hydrographique du bassin versant du Mercube (Renaud, 2004)	21
Figure 9 : Occupation des sols du bassin versant du Mercube pour l'année 2000 (source: Bugnet 2000)	22
Figure 10: Fonctionnement schématique de SWAT (d'après DUROS 2001)	26
Figure 11: structure hydrologique de SWAT (source Eckard et Arnold 2000)	27
Figure 12 : Processus de transfert de phosphore dans le sol modélisés par SWAT	28
Figure 13: Principe de délimitation des HRU (Renaud, 2004, d'après Duros 2002)	29
Figure 14: localisation de la station météo fournissant les données au modèle SWAT	33
Figure 15: Fenêtre de délimitation du bassin versant et du réseau hydrographique	34
Figure 16: Comblement des puits du MNT	35
Figure 17 : Méthode d'extraction du réseau hydrographique par l'algorithme D8	35
Figure 18: Représentation en perspective du MNT avant et après l'opération de "grattage" ...	36
Figure 19: Méthode d'extraction des limites du bassin versant (source: Payraudeau 2002) ...	36
Figure 20: Comparaison entre le réseau hydrographique digitalisé (a) et le réseau extrait du MNT (b) (Renaud, 2004)	37
Figure 21: Fenêtre permettant l'intégration des données d'occupation et sols	38
Figure 22: Table SWAT concernant les sols	39
Figure 23: Table SWAT concernant les types de cultures.	41
Figure 24: Interface permettant de déterminer la distribution des HRU	42
Figure 25: Vue SWAT créée après distribution des HRU	43
Figure 26: Interface d'intégration des données climatiques et table SWAT des stations météo	44
Figure 27: Interface permettant la modification des tables d'entrée	45
Figure 28: Interface permettant le découpage des années culturales par les différentes pratiques agricoles	46
Figure 29: Boîte de dialogue pour le lancement de la simulation	48
Figure 30 : Aperçu des différents modèles hydrologiques (source: Payraudeau 2002)	57

Graphiques et tableaux

Tableau 1 :code rotation des types de cultures du Mercube	40
Tableau 2: structuration de la table de localisation des pluviomètre (source : Di Luzio et al. 2002).....	44
Tableau 3: structure de la table des précipitations (source: Di Luzio et al. 2002)	44
Tableau 4 : Estimation “Baseflow”des contribution au débit par les écoulements de surfaces et souterrains.....	51
Tableau 5: coefficients de corrélation de la simulation au pas temps mensuel des années modélisées	53
Tableau 6 : coefficient de corrélation des débits au pas de temps hebdomadaire.....	54
graphique 1 : comparaison entre les débits simulés et observé au pas de temps mensuel	53
graphique 2: comparaison entre les débits simulés et observés au pas de temps mensuel (régression linéaire)	53
graphique 3 : comparaison entre débits simulés et observés au pas de temps hebdomadaires	54
graphique 4: comparaison entre débits observés et simulés au pas de temps hebdomadaire (régression linéaire)	54

Glossaire

ASCII : format texte standardisé

Aquifère : nappe phréatique et sa roche réservoir.

Bassin versant : surface drainée par un cours d'eau en amont d'un point définissant son exutoire.

CARTEL : Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et les Ecosystèmes Limniques

CIPEL : Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman

Coefficient de corrélation : outil d'analyse mesurant les relations entre deux séries de données

Coefficient de Nash : outils statistiques permettant de mesurer la concordance entre deux séries de données.

| **Curve Number** : méthode du *Soil Conservation Service* qui associe un numéro de courbe représentant un potentiel de ruissellement à chaque catégorie du sol

Supprimé :

| **Dbf ou Dbase** : « data base file » format de fichier à accès binaire

Supprimé :

Disque de Secchi : disque que l'on enfonce dans l'eau d'un lac pour en mesurer la transparence.

Eutrophisation : phénomène correspondant à un enrichissement des lacs en éléments nutritifs (phosphore et azote) dû au rejets engendrés par les activités anthropique

| **Exutoire** : point à partir duquel on définit un bassin versant amont et par où s'écoule l'eau interceptée par le bassin versant

HRU : « Hydrologic Response Unit » entité spatiale utilisée dans SWAT issue du croisement de la carte des sols et de la carte d'occupation des sols.

| **IDW** : « Inverse Distance Weight » méthode d'interpolation par pondération de la distance inverse

Supprimé :

IGN : Institut Géographique National

Krigeage : méthode d'interpolation basée sur des théories géostatistiques

Mésotrophe : Etat de transition entre les états oligotrophes et eutrophes

MNT : « Modèle Numérique de Terrain » représentation numérique en format raster d'une surface géographique avec des coordonnées x, y, z

Modèle : représentation simplifiée d'un système ou chaque processus est représenté par une relation mathématique

Oligotrophe : se dit d'un lac pauvre en éléments nutritif, caractérisé par des eaux limpides, un bon équilibre entre les végétaux, les animaux et les micro-organismes responsables de la décomposition des déchets organiques

Raster : format d'image numérique

Shp : fichier de formes vectoriel caractéristiques des produits de la gamme ESRI

SIG : Système d'Information Géographique

STEP : station d'épuration

SWAT: Soil and Water Assessment Tool

USLE : « Universal Soil Loss Equation ».Equation calculant les pertes en sols.

Annexes

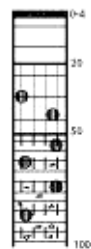
Profils de référence: BV du Mercube

Nom: MER 20

Localisation: (N46°21'34.5/E006°19'47.3)

taillis peuplé de chênes, bouleaux, charme, ronces, noisetier, saule...

présence d'un humus de type mull de manière localisée, litière discontinue de 0 à 4 cm d'épaisseur, turricules de vers (15%).



Description:

1er horizon: (0-20 cm) couleur: 2,5 Y 5.4
 structure: polyédrique subanguleuse moyenne, à sous structure grumelleuse peu nette
 texture: Limono-argileuse
 remarques: racines moyennes abondantes (horizontalisation vers 20 cm).
 Frais, plastique, non collant, porosité interagrégats, quelques pores tubulaires, quelques taches de matière organique, transition diffuse. pas de réponse à HCl

2ème horizon: (20-50 cm) couleur: 2,5 Y 5.4
 structure: polyédrique subanguleuse moyenne, à sous structure grumelleuse peu nette
 texture: Limono-argileuse
 remarques: Frais, plastique, cohérent, un peu plus collant. présence de taches rouille à bord diffus (15%) de couleur 10YR 8.5. présence de taches noires 10YR 2.1. Suintement au moment de la description
 porosité tubulaire grossière abondante, transition diffuse.
 Pas de réponse à HCl

3ème horizon: (50-90 et+) couleur: 7.10B matrice verdâtre (60%) et dépôts rougeâtres
 structure: Polyédrique grossière peu affirmée, sous structure polyédrique nette
 texture: Limono-argileuse, présence d'éléments grossiers polygéniques
 remarques: Humide, collant, porosité fissurale interagrégats, peu de racines eau libre

Profils de référence: BV du Mercube

Nom: MER 30

MER-30

Localisation: (N46'21"23.3/E006'20"38.8)

Zone de prairie anciennement cultivée, il reste encore quelques billons.



Description:

1er horizon:
(0-15 cm)

couleur: 10YR 4.3

structure: grumeleuse fine, nette.

grumeleuse peu nette

texture: Limono-sableuse, mais présence de quelques éléments grossiers

remarques: racines fines abondantes. Frais, non plastique, non collant,

porosité interagrégats, transition visible.

2ème horizon: couleur: 10YR 4.3

(15-35 cm)

structure: polyédrique subanguleuse moyenne nette

texture: Limono-sableuse, éléments grossiers plus abondants (20%)

remarques: Frais à humide, peu plastique, non collant. Porosité grossière

interagrégats, présence de petites racines très fines,

transition diffuse. Pas de réponse à HCl pour la matrice.

les éléments grossiers réagissent

3ème horizon: couleur: 10 YR 5.3

(35-50 cm)

structure: polyédrique subanguleuse moyenne nette.

texture: Limono-sableuse, éléments grossiers plus abondants (60%), blocs anguleux polygéniques

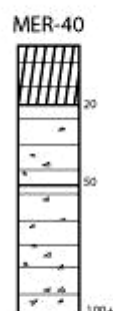
remarques: certains éléments grossiers réagissent à HCl

Profils de référence: BV du Mercube

Nom: MER 40

Localisation: (N46'21"39.5/E006'18"53)

Prairie artificielle, micro-topographie marquée (10-20 cm)



Description:

1er horizon:

(0-20 cm)

couleur: 7,5YR 3.2

structure: grumeleuse fine, sous structure polyédrique subangulaire

texture: Limono-argileuse

remarques: racines fines abondantes. Frais, non plastique, non collant, porosité interagrégats, transition visible. Pas de réponse à HCl

2ème horizon:

(20-65 cm)

couleur: 10YR 4.5

structure: polyédrique subanguleuse moyenne.

texture: Limono-sableuse, éléments grossiers

remarques: Frais, peu plastique, non collant. Porosité grossière interagrégats, présence de petites racines très fines, transition graduelle vers un horizon plus sableux. Réponse à HCl.

3ème horizon:

(65-100+ cm)

couleur: 10 YR 4.5

structure: particulière

texture: sablo-limoneuse abondance d'éléments grossiers

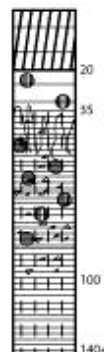
remarques: non plastique, peu collant. forte réponse à HCl

Profils de référence: BV du Mercube

Nom: MER 50

Localisation: (N46'21"49.6/E006'19"09.5)

profil effectué dans un taillis proche de la rivière présence de végétation hygrophiles (Carex...) Humus de type müll présent de manière localisée.



Description:

1er horizon:

(0-20 cm)

couleur: 7,5 YR 3.3

structure: grumeleuse fine

texture: Limoneuse

remarques: racines moyennes abondantes (horizontalisation vers 20 cm).

Sec à frais, non plastique, non collant, porosité interagrégats, quelques pores tubulaires, quelques taches de matière organique transition nette. pas de réponse à HCl

2ème horizon:

(20-35 cm)

couleur: 7,5 YR 4.4

structure: polyédrique subanguleuse peu nette

texture: Argilo-limono-sableuse

remarques: présence de tâches rouille à bord diffus (15%) de couleur 10YR 8.5. présence de gleys gris. Présence de racines fines porosité tubulaire et interagrégats fine, transition graduelle s'organisant autour des digitations. Réponse à HCl

3ème horizon:

(35-100 cm)

couleur: 4,5BG et dépôts rougeâtres de taille plus importante

structure: Polyédrique grossière peu affirmée, sous structure polyédrique nette

texture: argileuse, présence d'éléments de petite taille répondant à HCl

remarques: eau libre à 55 cm, diminution de l'abondance des éléments grossiers avec la profondeur.

4ème horizon:

(100-140+)

couleur: bleue

structure: Polyédrique grossière peu affirmée, sous structure polyédrique nette

texture: argileuse (45%)

remarques: disparition des tâches rouge



PROFIL MER 20



PROFIL MER 30



PROFIL MER 40



PROFIL MER 50

L'équipement du bassin à l'exutoire :

A gauche, le limnigraphe en 2003. A droite le limnigraphe et le seuil jaugeur en 2004 après les événements destructeurs de l'hiver 2003.

